doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.030

东北旱作区土壤碳氮磷生态化学计量特征及其影响因素

卓志清[1]　李　勇[1]　兴　安[1]　曹　梦[1]　黄元仿[1,2]　赵云泽[1]

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 自然资源部农用地质量与监控重点实验室, 北京 100193)

摘要: 为探究旱作农田土壤碳氮磷生态化学计量特征,基于 2017 年采集的 132 个耕层(0 ~ 20 cm)土壤样品,运用地统计学和冗余分析等方法,分析了东北旱作区土壤碳氮磷生态化学计量特征的空间变异性及影响因素。结果表明:研究区土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)的平均含量(质量比)分别为 16.79、1.43、0.77 g/kg,且彼此间存在显著正相关关系($P<0.05$);土壤 C/N、C/P、N/P 质量比的平均值分别为 11.45、22.82、2.03,均低于全国农田土壤平均值。从空间分布规律来看,SOC、TN、TP 含量均呈现由西南向东北递增的趋势,高值区主要分布在黑龙江省旱作区北部,低值区在吉林省和辽宁省旱作区西部平原区。土壤 C/N、C/P 的高值区主要分布在黑龙江省旱作区,低值区位于吉林省和辽宁省旱作区连片分布,N/P 则整体变化较小。研究区土壤碳氮磷生态化学计量特征受人为活动、环境及土壤性状的综合影响,化肥施用强度和土地利用强度是影响土壤碳氮磷生态化学计量特征的重要人为因素,土壤容重和含水率则是影响研究区土壤碳氮磷生态化学计量特征分布规律的主要环境因子。

关键词: 旱作区; 生态化学计量; 冗余分析; 耕层

中图分类号: S158.5　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2019)10-0259-10

Characteristic of Ecological Stoichiometry of Soil C, N and P and Its Influencing Factors in Dry Farming Region of Northeast China

ZHUO Zhiqing[1]　LI Yong[1]　XING An[1]　CAO Meng[1]　HUANG Yuanfang[1,2]　ZHAO Yunze[1]

(1. *College of Resources and Environment Sciences*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100193, *China*
2. *Key Laboratory of Agricultural Land Quality*, *Ministry of Natural Resources*, *Beijing* 100193, *China*)

Abstract: The eco-stoichiometry of soil nutrients has been successfully used in indicating soil quality and revealing the circulation and balance mechanism, and the information about eco-stoichiometry of soil carbon, nitrogen and phosphorus can help to conduct soil nutrient management. However, the soil stoichiometry characteristics in dry farming region are poorly documented. To explore the spatial distributions of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and ecological stoichiometric characteristics of soil C, N and P in dry farming region of Northeast China, totally 132 topsoil samples (0 ~ 20 cm) were collected in 2017, and SOC, TN, TP and other properties were analyzed in all samples. The spatial variability of eco-stoichiometry of soil C, N and P and its influencing factors were analyzed by geostatistics and redundant analysis. The results showed that the mean content of SOC, TN and TP in the study area was 16.79 g/kg, 1.43 g/kg and 0.77 g/kg, respectively; and soil C/N, C/P, N/P ratios were 11.45, 22.82 and 2.03, respectively. Correlation analysis of soil C, N and P showed that significant correlations were existed among C, N, and P ($P<0.05$). Soil C/N, C/P, N/P ratios were lower than their average value on a national scale. The distribution of soil SOC, TN and TP were increasing from southwest to northeast, with the high value areas mainly distributed in the northern part of the dry farming region of Heilongjiang Province, and the low value areas were in the dry farming region of Jilin and Liaoning Provinces. The high value areas of soil C/N and C/P were mainly distributed in the dry farming region of Heilongjiang Province, the low value region was located in the dry farming area of Jilin and Liaoning Provinces, and the spatial variation of N/P was small in the study area. The eco-stoichiometric characteristics of soil C, N and P in the study area were affected by tillage and

收稿日期: 2019-03-16　修回日期: 2019-06-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300801)和国家自然科学基金项目(41571217)

作者简介: 卓志清(1989—),男,博士生,主要从事土壤养分与土地利用研究,E-mail: zhiqingzhuo@cau.edu.cn

通信作者: 黄元仿(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事计量土壤学和数字农业研究,E-mail: yfhuang@cau.edu.cn

fertilization, environmental factors and soil properties. Intensity of chemical fertilizers application and land use was an important human factor affecting the eco-stoichiometric of soil C, N and P. RDA indicated that soil bulk density and water content were the main soil physical and chemical factors affecting the eco-stoichiometric characteristics of soil C, N and P in dry farming region of Northeast China.

Key words: dry farming region; ecological stoichiometry; redundancy analysis; plough horizon

0 引言

生态化学计量学(Ecological stoichiometry)已经成为研究生态系统各组分主要构成元素平衡及耦合关系的重要方法,在生物地球化学循环和生态系统稳定性等研究领域发挥了极其重要的作用[1-2]。土壤作为陆生生态系统的基质,是诸多生态过程的载体,对植物的生长起到关键作用,并直接影响植物群落的组成、稳定和演替[3-5];而土壤碳、氮、磷等元素不仅是土壤养分的重要组成部分,同时也是植物生长所必需的元素,直接影响土壤微生物动态、凋落物分解以及土壤养分的积累与循环[6-8]。由于土壤中的养分元素在生态过程中既相互独立又互相耦合,仅分析养分元素本身的变化难以阐明生态系统中土壤养分的整体变异特征,必须深入分析各养分元素之间的比例关系[9-10]。因此,研究土壤养分的生态化学计量特征对了解土壤质量、揭示土壤养分之间的耦合关系和平衡机制具有重要意义。

目前,关于生态化学计量学的报道主要集中于陆地和水生生态系统。土壤 C/N 能用于预测森林土壤硝态氮淋溶程度,土壤 N/P 还能反映植被受干扰程度[11]。在退化草地生态系统和喀斯特石漠化生态系统的研究中表明,SOC 含量和 N 含量对区域土壤 C、N、P 化学计量特征变化过程具有决定作用[12-13]。此外,在不同类型湿地生态系统中,湿地土壤 C/N、C/P 和 N/P 均表现为随土层深度的增加而减少[14-15];在闽江河口湿地生态系统的研究中还发现,湿地土壤 C/P 和 N/P 对厌氧碳分解具有较好指示作用[16]。针对森林、草地、湿地等陆生生态系统,土壤与植物的生态交互作用以及土壤碳氮磷生态化学计量学特征已经进行了广泛研究[17-19],而农田生态系统土壤碳氮磷生态化学计量特征对农作物生长及农田生态系统结构、过程和功能同样具有重要影响[20-21]。研究农田土壤碳氮磷生态化学计量学特征,可揭示土壤养分的可获得性,有助于阐明农田土壤养分循环和土壤质量演变趋势[22-23]。由于农田生态系统土壤碳、氮、磷受成土母质、土壤类型、土地利用类型以及耕作施肥等因素的综合影响,与其他陆地生态系统相比,其空间异质性更为明显[24-26]。已有研究在田块、绿洲和小流域等不同尺度,采用相关分析、方差分析和地理加权回归等方法,分析了耕作措施、环境因子以及土壤理化性状对农田土壤生态化学计量特征的影响[23,27]。而在较大地理空间尺度上,针对旱作农田土壤碳氮磷生态化学计量特征、影响因素及其在区域物质循环中的作用还需进一步探讨。本文以东北旱作区土壤碳、氮、磷元素为研究对象,分析区域尺度下土壤碳氮磷生态化学计量特征的空间格局,并运用冗余分析(Redundancy analysis, RDA)研究其与环境及土壤理化因子的关系,以期为旱作农田土壤养分的科学管理和分区耕作培肥提供技术依据和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

基于 2015 年黑龙江省、吉林省和辽宁省的 1 km^2网格土地利用现状图,根据有关坡度分级标准,将地形坡度小于 5°、1 km^2网格内旱地占耕地面积 40% 以上的区域作为旱作区[28]。区域涵盖黑龙江省、吉林省和辽宁省各自的 46、19、20 个县(市),涉及县级行政单元总面积约 2.956×10^5 km^2。区域多年平均日照时数 2 400 ~ 2 700 h,大于等于 10℃积温 2 000 ~ 3 400℃。黑龙江东、北部和吉林东部等半湿润易旱区年降水量 500 ~ 600 mm,土壤类型以黑土、白浆土和草甸土为主;黑龙江省、吉林省和辽宁省西部等半干旱区和半干旱偏湿润区年降水量 350 ~ 500 mm,土壤类型主要为黑钙土、棕壤和盐渍土。研究区地貌属于山麓冲积平原及台地,耕地破碎度较小且耕作条件良好,主要种植玉米、小麦等粮食作物和大豆、甜菜等经济作物,是我国北方重要旱作作物种植区及商品粮基地(图 1)。

1.2 数据来源及处理

利用 ArcGIS 10.3 软件提取 2015 年土地利用类型现状图中的旱地斑块(含水浇地),将所提取数据和研究区行政区划矢量数据叠置,获得空间属性数据。在研究区以 15 km × 15 km 网格布点并抽取旱地斑块(含水浇地),结合土壤亚类进行分层抽样,抽样时考虑种植体系、分布面积和集中程度等因素,主要在黑土、黑钙土、棕壤、潮土、暗潮土等土类布设,保证每个土壤亚类均有样点分布。根据上述样点布设和抽样规则共确定 132 个采样点,其中黑土

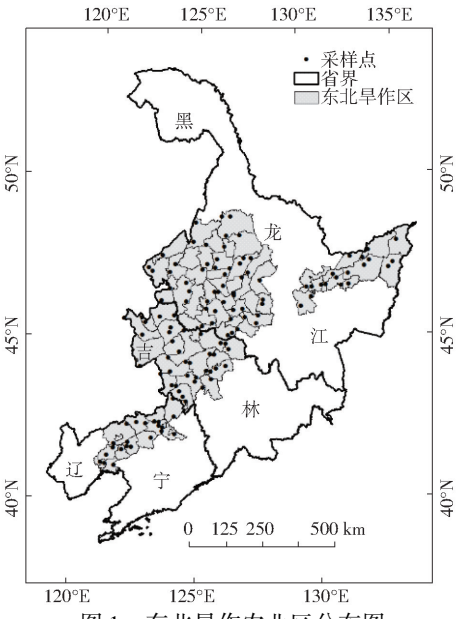

图 1　东北旱作农业区分布图

Fig. 1　Distribution map of dry farming region of Northeast China

采样点 35 个；黑钙土采样点 33 个；棕壤、暗棕壤采样点 18 个；潮土、暗潮土采样点 36 个，其余土类采样点共计 10 个。土样采于 2017 年 5—6 月，兼顾样点空间分布的均匀性和代表性，采集表层土壤（0 ~ 20 cm）样品，每个点设 3 个重复并充分混匀，按四分法取 1 kg 土样入袋；采用环刀法取原状土测定土壤容重及含水率，并用 GPS 记录样点经纬度。土壤样品经自然风干后，研磨过筛，用于分析土壤理化性质，包括土壤有机碳（Soil organic carbon，SOC）、全氮（Total nitrogen，TN）、全磷（Total phosphorus，TP）含量及电导率（Electrical conductivity，EC）。土壤有机碳含量采用重铬酸钾外加热法[29]，全氮、全磷含量应用流动分析仪测定，土壤电导率采用电极法，pH 值采用电位法，土壤颗粒组成采用激光粒度仪测定，土壤碳氮比（C/N）、碳磷比（C/P）和氮磷比（N/P）均采用质量比。研究区粮食作物产量、化肥施用量等数据源于 2015 年东北各省统计年鉴，为消除因行政区划调整对数据分析造成的影响，本文以研究区 2015 年行政区划为准。

1.3　研究方法

1.3.1　半变异函数

利用半变异函数能够分析东北旱作区土壤碳、氮、磷及生态化学计量比在空间上的变异特征，并可以区分结构因素与随机因素对其空间变异特征的影响。通过半变异函数得到块金值、基台值和变程 3 个重要参数，分别用 C_0、$C_0 + C$ 和 a 表示[30]。块金值和基台值的比值 $C_0/(C_0 + C)$ 为块金系数，可反映参数的空间自相关程度及随机因素对总变异贡献的大小。当块金系数小于 25% 时，表明有强的空间相关性，变异性主要受结构性因素（气温、降水等）影响；当块金系数在 25% ~75% 之间时，表明有中等程度空间相关性，变异性受结构性和随机性因素（土壤性质、施肥和种植制度等）共同作用；当块金系数大于 75% 时，表明空间相关性较弱，变异性主要受随机因素影响[31]。

1.3.2　全局空间自相关

全局莫兰指数（Moran's I）能够识别空间要素或其属性值整体的空间自相关性。本研究基于 ArcGIS 10.3 软件平台，运用全局 Moran's I 计算研究区土壤 SOC、TN、TP 含量的空间自相关程度。全局 Moran's I 的取值介于 $[-1,1]$，在给定显著性水平下，若 Moran's I 大于 0，表明存在正的空间自相关，土壤 SOC、TN、TP 含量呈现空间聚合特征；若 Moran's I 小于 0，表明存在负的空间自相关，土壤 SOC、TN、TP 含量呈现空间离散特征。当 Moran's I 的标准化值 $|Z| > 1.96$（$P < 0.05$）时，表明研究区土壤 SOC、TN、TP 含量存在显著的空间自相关性[18]。

1.3.3　冗余分析

采用 CANOCO 5.0 软件对研究区土壤生态化学计量特征与环境因子及土壤属性的关系进行冗余分析。在冗余分析所需的两个数据矩阵中，将土壤 SOC、TN、TP 含量和 C/N、C/P、N/P 作为一个数据矩阵；将环境因子与土壤属性作为一个数据矩阵，主要包括平均气温（Mean temperature，MET）、湿度（Humidity，Hum）、年降水量（Annual precipitation，APR）、纬度（Latitude，Lat）、经度（Longitude，Lon）、土壤容重（Bulk density，BD）、含水率（Soil water content，SWC）、电导率、pH 值、粉粒（Silt）含量和粘粒（Clay）含量共 11 个指标。分析结果采用 Cano Draw 作图，并通过前向选择对土壤因子重要性进行排序。

2　结果与分析

2.1　土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量统计特征

参照全国第二次土壤普查养分分级标准，研究区土壤 SOC、TN、TP 含量的平均值均处于 3 级水平。土壤 SOC、TN 含量的平均值由大到小均为黑龙江省、吉林省、辽宁省，且黑龙江省显著高于吉林省和辽宁省旱作区（$P < 0.05$）；而土壤 TP 含量的平均值由大到小为黑龙江省、辽宁省、吉林省（表 1）。除黑龙江省旱作区外，吉林省、辽宁省旱作区土壤 SOC、TN、TP 的含量均低于我国农田土壤（0 ~ 10 cm）SOC、TN、TP 含量的平均值[32]。黑龙江省、吉林省

和辽宁省旱作区土壤 C/N 的平均值由大到小为黑龙江省、吉林省、辽宁省,且黑龙江省显著高于吉林省和辽宁省($P<0.05$);而土壤 N/P 的平均值由大到小为吉林省、黑龙江省、辽宁省,但彼此间差异不显著($P>0.05$)。除黑龙江省旱作区土壤 C/N 略高于全国农田土壤平均值外,吉林省和辽宁省旱作区土壤 C/N、C/P 和 N/P 均低于全国农田土壤的平均值。

表 1 东北旱作区土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量特征描述性统计

Tab. 1 Descriptive statistics of soil C, N and P and eco-stoichiometric ratio in dry farming region of Northeast China

区域	SOC 质量比/(g·kg^{-1})	TN 质量比/(g·kg^{-1})	TP 质量比/(g·kg^{-1})	C/N	C/P	N/P
黑龙江省	(22.10±0.38)^{a}	(1.74±0.32)^{a}	(0.90±0.28)^{a}	(12.79±0.27)^{a}	(25.07±0.30)^{a}	(1.99±0.23)^{a}
吉林省	(11.26±0.43)^{b}	(1.13±0.34)^{b}	(0.55±0.48)^{b}	(9.91±0.28)^{b}	(21.64±0.39)^{b}	(2.19±0.30)^{a}
辽宁省	(9.52±0.34)^{b}	(0.99±0.31)^{b}	(0.73±0.97)^{ab}	(9.85±0.29)^{b}	(17.81±0.40)^{b}	(1.88±0.42)^{a}
平均值	16.79±0.53	1.43±0.40	0.77±0.53	11.45±0.29	22.82±0.36	2.03±0.29

注:同列不同小写字母表示土壤生态化学计量特征指标在不同地区之间的差异显著($P<0.05$),下同。

土壤有机氮占全氮含量的 95% 以上,而有机氮主要在土壤有机物结构中结合,因此二者关系变化密切[1,3]。对研究区土壤 SOC、TN、TP 含量进行相关性分析(图 2),结果显示 SOC、TN、TP 三者之间均存在显著相关关系($P<0.05$)。SOC 和 TN 含量之间拟合程度较好,决定系数 R^2 为 0.86,TN 和 TP 之间、SOC 和 TP 之间的线性拟合程度相对较低,决定系数 R^2 分别为 0.44 和 0.48。

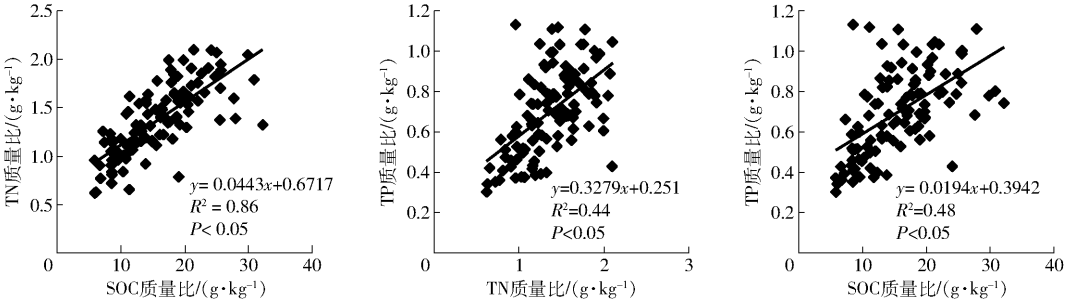

图 2 东北旱作区土壤碳、氮、磷含量的关系

Fig. 2 Correlation of soil C, N, and P in dry farming region of Northeast China

2.2 土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量比空间变异

东北旱作区土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量比的半变异函数模型及全局 Moran's *I* 统计量见表 2。经 K-S 检验发现,C/P 符合正态分布,SOC、TN、TP 含量和 C/N、N/P 均符合对数正态分布。研究区土壤 SOC、TN、TP 含量及 C/N、C/P、N/P 的 Moran's *I* 均为正值,表明其呈现空间聚合特征,但彼此间的聚合程度存在一定差异。土壤 SOC、TN、TP 含量及 C/N、C/P 的 Moran's *I* 标准化 *Z* 值均大于显著性检验的临界值 2.56($P<0.01$),表明C/N 和 C/P 在研究区存在较明显的空间自相关性,即高值点周围样点相应值高,低值点周围样点相应值低;而 N/P 虽然呈现集聚特征,但空间自相关性并不显著。

表 2 东北旱作区土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量比半变异函数模型及全局 Moran's *I*

Tab. 2 Oretical models for anisotropic semivariograms of soil C, N and P and eco-stoichiometric ratio and their global Moran's *I*

指标	偏度	峰度	转换	模型	块金系数	莫兰指数	*Z*	*P*
SOC 含量	-0.32	2.95	lg	指数	0.13	0.45	8.34	<0.01
TN 含量	-0.53	3.97	lg	指数	0.34	0.32	5.95	<0.01
TP 含量	-0.38	2.84	lg	球状	0.18	0.26	4.91	<0.01
C/N	-0.05	3.84	lg	球状	0.10	0.21	3.93	<0.01
C/P	0.77	3.13		高斯	0.37	0.21	3.92	<0.01
N/P	-0.46	4.75	lg	球状	0.82	0.03	0.74	>0.10

基于最优半变异函数模型及全局空间自相关分析,对东北旱作区土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量比进行克里金插值。独立验证结果表明(表 3),SOC、TN、TP 含量和 C/N、C/P、N/P 的实测值与预测值呈显著相关($P<0.05$),且平均误差(ME)趋近于 0,均方根误差(RMSE)较小。可见

利用克里格插值法的空间插值结果相对可靠。从图 3 可知，东北旱作区土壤 SOC、TN、TP 含量均呈现由西南向东北递增的趋势，空间变化具有一致性。高值区主要分布在小兴安岭南麓、东北平原北部及三江平原地区，低值区则主要集中在吉林省和辽宁省旱作区的西部平原区。研究区土壤 C/N、C/P 呈现相同的空间分布特征，高值区呈斑块状散布于东北平原北部及三江平原南部，低值区在吉林省和辽宁省旱作区连片分布；而土壤 N/P 的高值区在东北旱作区西北部大面积分布，低值区则呈斑块状零散分布于黑龙江省旱作区东部和吉林省、辽宁省旱作区的南部。

表 3　插值结果的精度统计检验

Tab. 3　Precision statistics verification of interpolation

	SOC 含量	TN 含量	TP 含量	C/N	C/P	N/P
R	0.710**	0.530**	0.490**	0.370**	0.320**	0.250*
ME	−0.037	−0.021	−0.092	−0.060	−0.002	−0.006
RMSE	6.015 g/kg	0.454 g/kg	0.394 g/kg	5.080	8.120	0.628

注：**、* 分别表示 0.01、0.05 水平（双侧）相关；样本数为 131，下同。

2.3　土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量比的影响因素

2.3.1　化肥施用量及粮食产量的影响

为探讨施肥强度与土地利用强度对土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响，依照全国生态县、市、省建设指标和全国耕地类型区等级划分标准，将东北旱作区各县域单位划分为化肥施用高强度区（350 ~ 450 kg/hm^2）、中强度区（250 ~ 350 kg/hm^2）、低强度区（0 ~ 250 kg/hm^2）以及粮食高产区（>6 000 kg/hm^2）、中产区（4 500 ~ 6 000 kg/hm^2）、低产区（0 ~ 4 500 kg/hm^2），并应用 ArcGIS 栅格计算将县域粮食产量和化肥施用强度划分为 7 个类型区（图 4）。由图 4 可知，低−低类型区（低施肥强度和低产量）和低−中类型区（低施肥强度和中产量）均分布在黑龙江省旱作区北部，高−高类型区（高施肥强度和高产量）和高−中类型区（高施肥强度和中产量）均集中在吉林省和辽宁省旱作区东部，粮食单产与化肥施用强度的空间变化具有一致性。

由表 4 可知，不同化肥施用强度下土壤 SOC、TN 含量及 C/P、N/P 由大到小均表现为低强度区、

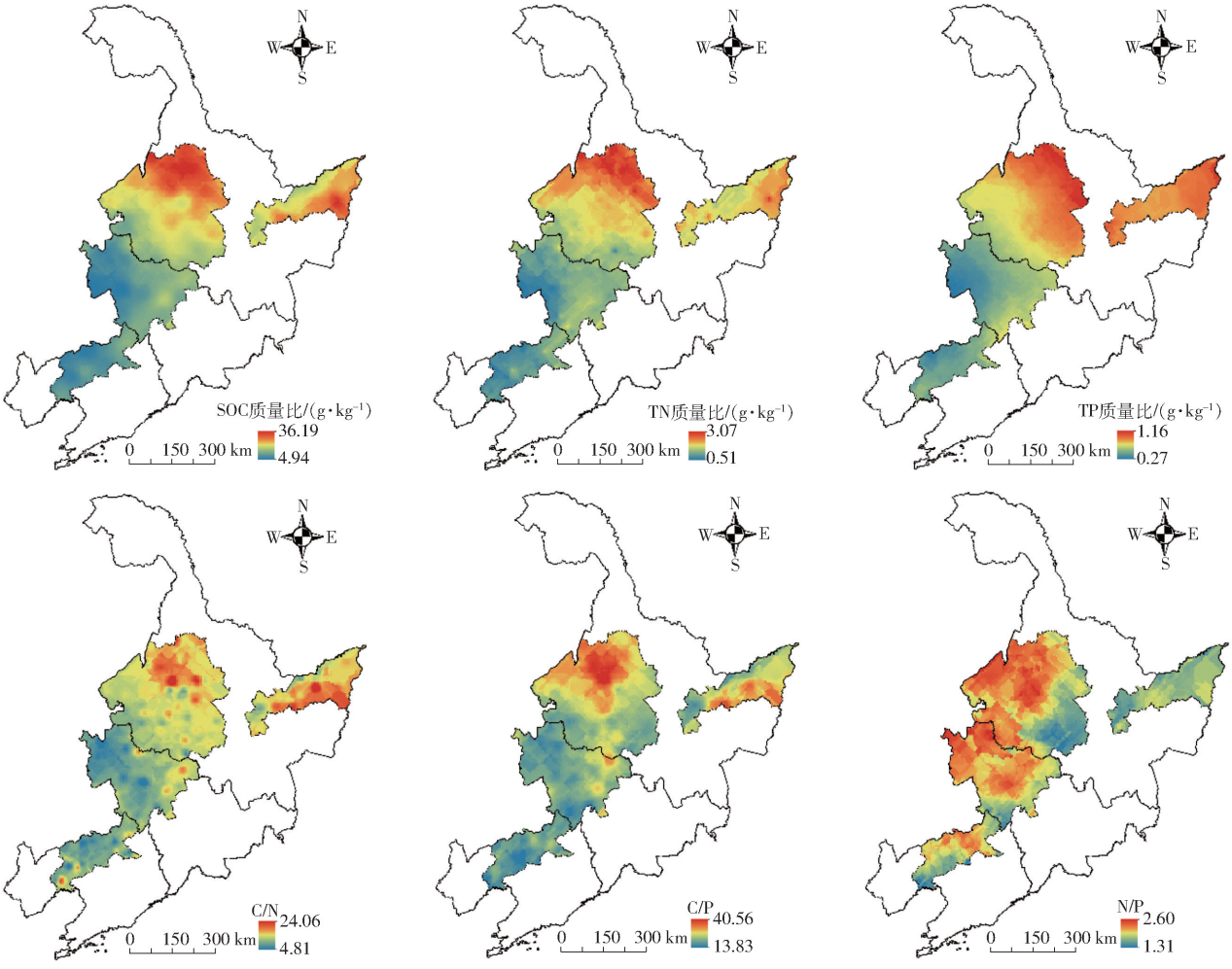

图 3　东北旱作区土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量特征空间分布图

Fig. 3　Spatial distribution maps of soil C, N and P and eco-stoichiometric ratio in dry farming region of Northeast China

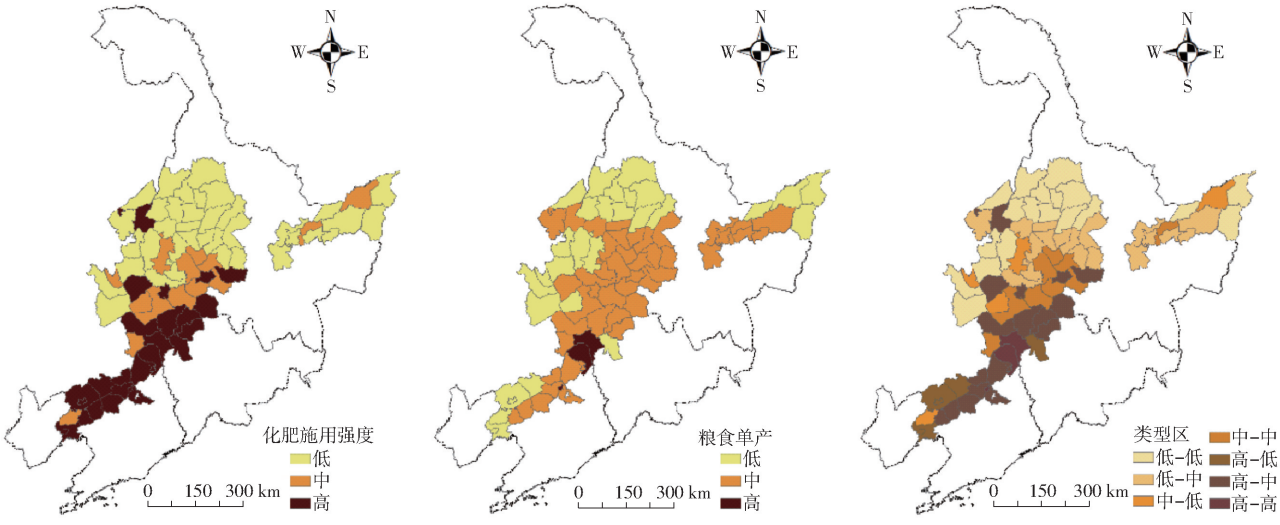

图 4 东北旱作区化肥施用强度和粮食单产空间分布特征

Fig. 4 Spatial distribution maps of fertilizer application intensity and grain yield in dry farming region of Northeast China

中强度区、高强度区,土壤 TP 含量和 C/N 则表现为低强度区、高强度区、中强度区。不同粮食产量区土壤 SOC、TN、TP 含量及 C/N、C/P 均表现为低产区、中产区、高产区,土壤 N/P 则表现为低产区、高产区、中产区,但无显著差异(表 4)。已有研究表明,长期“高氮高产”的种植模式虽然提高了产量,但高产区土地利用强度大,养分流失严重且地表作物大多被人为收取,归还量较小;而化肥施用多以速效养分作为补充,因忽视培肥而导致基础地力下降,造成高化肥施用强度区和高产区土壤 SOC、TN、TP 含量及 C/N、C/P、N/P 相对较低[33]。化肥施用的低强度区和粮食低产区土壤 SOC、TN、TP 含量及C/N、C/P、N/P 相对较高,主要原因一方面是其位于东北旱作区北部,气温较低,有机质分解缓慢,微生物分解有机质所需的氮素减少,导致多余部分释放到土壤中[34]。另外,在 N 素累积的情况下,即便低强度的化肥及有机肥施用,也在一定程度上提高了农田土壤的氮储量;而磷的主要来源是成土母质的风化,其在土壤中移动性小,加之磷肥本身施用量有限,导致 N/P 相对较高[35]。

2.3.2 环境及土壤属性的影响

如表 5 所示,土壤 C/N、C/P 和 N/P 除受到各元素本身含量的影响外,还受到土壤理化性状、气候及环境因子的显著影响。土壤含水率、粉粒含量和

表 4 不同化肥施用强度区和粮食产量区土壤碳、氮、磷生态化学计量特征

Tab. 4 Soil C, N and P and eco-stoichiometric ratio in areas with different fertilizer application intensity and grain yield

指标	区域	SOC 质量比/(g·kg^{-1})	TN 质量比/(g·kg^{-1})	TP 质量比/(g·kg^{-1})	C/N	C/P	N/P
化肥施用量	低强度区	(22.16±0.44)^{a}	(1.75±0.35)^{a}	(0.85±0.35)^{a}	(12.56±0.28)^{a}	(26.13±0.33)^{a}	(2.13±0.27)^{a}
	中强度区	(13.16±0.40)^{b}	(1.21±0.31)^{b}	(0.66±0.45)^{b}	(10.82±0.24)^{a}	(20.85±0.28)^{b}	(1.98±0.25)^{a}
	高强度区	(12.66±0.46)^{bc}	(1.19±0.38)^{bc}	(0.73±0.72)^{ab}	(11.17±0.62)^{a}	(19.93±0.36)^{bc}	(1.91±0.35)^{a}
粮食产量	低产区	(17.45±0.65)^{a}	(1.48±0.50)^{a}	(0.78±0.68)^{a}	(11.25±0.33)^{a}	(23.47±0.41)^{a}	(2.12±0.33)^{a}
	中产区	(16.98±0.44)^{a}	(1.43±0.33)^{a}	(0.76±0.38)^{a}	(11.81±0.28)^{a}	(22.75±0.31)^{a}	(1.96±0.25)^{a}
	高产区	(13.46±0.21)^{a}	(1.31±0.20)^{a}	(0.73±0.44)^{a}	(10.46±0.21)^{a}	(20.77±0.34)^{a}	(2.00±0.32)^{a}

表 5 土壤碳、氮、磷生态化学计量特征与环境因子之间的相关系数

Tab. 5 Correlation analysis of SOC, TN and TP contents with environmental factors

	BD	SWC	Silt 含量	Lat	Lon	MET	Hum	APR	pH 值	Clay 含量	EC
SOC 含量	-0.640**	0.700**	0.636**	0.670**	0.503**	-0.596**	0.557**	0.237**	-0.176*	0.456**	0.200*
TN 含量	-0.592**	0.635**	0.579**	0.610**	0.392**	-0.545**	0.505**	0.231**	-0.163	0.377**	0.297**
TP 含量	-0.341**	0.340**	0.304**	0.242**	0.269**	-0.214*	0.232**	0.059	-0.069	0.179*	0.312**
C/N	-0.311**	0.326**	0.238**	0.267**	0.274**	-0.242**	0.256**	0.076	-0.050	0.188*	-0.047
C/P	-0.298**	0.414**	0.329**	0.424**	0.227**	-0.352**	0.259**	0.119	-0.030	0.328**	-0.123
N/P	0.071	0.119	0.010	0.125	-0.122	-0.090	-0.041	-0.014	0.041	0.066	-0.152

粘粒含量与 SOC、TN、TP 含量、C/N 和 C/P 呈显著正相关($P<0.05$)，土壤容重与 SOC、TN、TP 含量、C/N 和 C/P 呈极显著负相关($P<0.01$)。土壤电导率与 SOC、TN、TP 含量呈显著正相关($P<0.05$)，土壤 pH 值与 SOC 含量呈显著负相关($P<0.05$)，平均气温与 SOC、TN、TP 含量、C/N 和 C/P 呈显著负相关($P<0.05$)。

对环境及土壤性状指标与土壤碳氮磷生态化学计量特征进行冗余分析(RDA)，得到其对土壤碳氮磷生态化学计量特征影响的二维排序图(图 5)。土壤碳氮磷化学计量特征在第 1 轴、第 2 轴的解释量分别为 46.72% 和 7.28%，累计解释量为 54.00%，由此可知前两轴能够很好地反映土壤碳氮磷化学计量特征与各因素的关系，且主要由第 1 轴决定。土壤碳氮磷化学计量特征指标用虚线表示，各影响因素用实线表示，两个箭头连线的夹角可以看作是土壤碳氮磷化学计量特征指标和影响因子相关系数的大小。当夹角在 0°～90°时，两个变量之间呈正相关；当夹角在 90°～180°时，二者之间呈负相关；当夹角为 90°时，表示二者没有相关关系[36]。

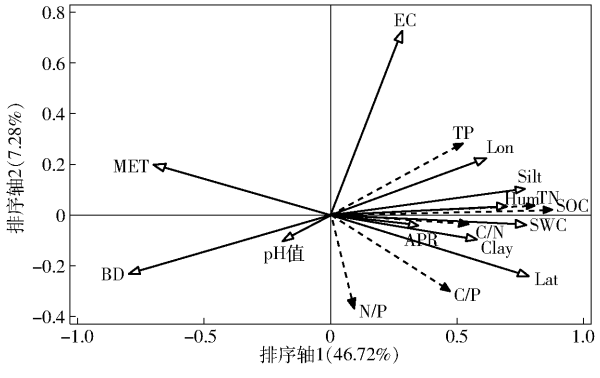

图 5　影响因子与土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量特征 RDA 二维排序图

Fig. 5　Two-dimensional sequence diagram of RDA analysis of influencing factors, soil C, N and P and eco-stoichiometric ratio

由表 6 可知，环境和土壤理化指标对土壤碳氮磷化学计量特征的影响存在差异，各影响因素对土壤碳氮磷生态化学计量特征贡献率由大到小依次为土壤容重、含水率、纬度、电导率、粉粒含量、经度、平均气温、年降水量、湿度、pH 值、粘粒含量，其中土壤容重、含水率、纬度、电导率、粉粒含量对土壤碳氮磷生态化学计量特征影响极显著($P<0.01$)，经度对土壤碳氮磷生态化学计量特征影响显著($P<0.05$)，而年平均气温、年降水量、湿度、pH 值和粘粒含量对其的影响未达到显著水平。土壤容重和含水率的解释量占所有影响因子解释量的比例分别为 31.70% 和 10.10%，说明土壤容重和含水率是影响土壤碳氮磷生态化学计量特征的主要土壤属性因子。

表 6　影响因子解释量及显著性检验

Tab. 6　Explanation rate of influencing factors and Duncan test

因子	因子解释量/%	*F*	*P*
容重	31.70	61.90	0.002
含水率	10.10	24.90	0.002
纬度	3.50	9.70	0.002
电导率	3.00	6.10	0.002
粉粒含量	2.00	6.50	0.002
经度	1.70	3.20	0.026
平均气温	0.80	2.50	0.064
年降水量	0.40	1.10	0.318
湿度	0.40	1.50	0.198
pH 值	0.20	0.40	0.724
粘粒含量	<0.1	0.20	0.876

3　讨论

3.1　土壤碳、氮、磷化学计量特征

研究表明，农田土壤有机碳主要来源于动植物残体的矿化分解与转化累积，生物固氮、降雨、灌溉及其肥料的施用是土壤氮素的主要来源，其存在形态受矿化与固定、硝化与反硝化等过程的影响[37]；而土壤磷元素主要来自成土母质、施肥和地表作物的归还，磷的累积与转化同样受到微生物分解的影响。东北旱作区 SOC、TN、TP 含量整体平均值分别为 16.79、1.43、0.77 g/kg，均高于我国农田 0～10 cm土壤 SOC、TN、TP 含量均值[23]，但各省旱作区之间存在差异，这与张兴义等[37]在东北薄层农田黑土的研究结果一致。研究区土壤 SOC、TN 和 TP 含量在空间上呈现由东北向西南递减的趋势。低温减缓了有机质的分解，有助于有机碳的积累，同时由于微生物分解有机质所需的氮素减少，氮素积累增加。有机质含量的提高促进了微生物的活性，从而使土壤有效磷含量提高。可见土壤 SOC、TN 和 TP 之间的关系，是其呈现空间分布一致性的主要原因[24]。但由于不同采样点的耕作和施肥存在差异，导致土壤 SOC、TN 含量在局部地区呈现较强的变异性。

C/N 影响微生物分解有机质的速率，从而影响土壤中有机碳和氮的循环。在一定范围内，C/N 越高，有机残体分解越慢；土壤 C/N 较低时，超过微生物生长所需的氮素就会释放到土壤中，土壤氮素逐渐增加。研究区土壤 C/N 的均值为 11.45，略低于全国农田土壤的平均值，主要原因一方面是化肥施用提高了微生物量及其活性，加速作物残茬和有机碳的矿化速率，降低了土壤有机碳的含量；另一方面，秸秆还田量相对较少，农田土壤有机质积累不

足[38]。C/P 是磷有效性的表征参数,低 C/P 有利于微生物分解有机质释放养分。已有研究表明当 C/P 小于 200 时,将会出现土壤有机磷的净矿化,有效 P 含量增加[39]。研究区土壤 C/P 平均值远低于全国农田的平均值 60.00,可见研究区土壤 P 有效性可能较高。N/P 可视为 N 饱和的诊断指标,由于生物固氮随 N/P 的减小而增大,而东北旱作区土壤 N/P 低于全国农田的平均值 5.10,且远低于南方耕地土壤 N/P,反映出研究区土壤生物固氮量相对较高[40]。

3.2 土壤碳、氮、磷化学计量特征的影响因素

农田土壤生态化学计量特征受区域水热条件、土壤母质的风化作用等自然环境以及耕作、施肥等人为因素的综合调控,不同土地利用强度对农田土壤 C、N、P 储量及循环过程有着显著的影响。东北旱作区土壤 SOC、TN、TP 含量及 C/P 均随施肥强度和粮食单产的增加而下降,这与张晗等[41]对不同土地利用方式下农田土壤 SOC、TN、TP 含量变化特征的研究结果一致。一方面是目前在高氮高产的施肥策略下氮肥施用量大,有机质积累缓慢,另一方面高产区农业机械化程度高,高强度的耕作导致表层土壤结构遭受破坏,使土壤有机碳、氮、磷容易随地表径流流失、渗漏,从而导致高产区土壤 C/N 较低[42]。区域土壤 TP 含量和 N/P 均在低施肥强度区和低产区较高,这主要与气候条件及土壤母质风化程度有关。此外,本次采样调查表明,黑龙江省旱作区北部主要实行玉米-大豆轮作,而吉林省和辽宁省旱作区主要为玉米连作。相关研究发现东北黑土区长期玉米-大豆轮作能够提高 SOC、TN 含量,同时土壤 pH 值出现下降趋势;长期玉米连作虽可增加高活性、易氧化的 SOC 含量,但若没有配合采用合理的耕作措施,会增加 SOC 矿化分解的风险[43]。因此,区域种植模式的差异可能对土壤碳氮磷生态化学计量空间分布特征也有一定影响,还需深入分析。

不同气候条件及土壤性质下,表层土壤养分变化很大,导致土壤碳氮磷生态化学计量特征存在较大空间异质性。研究区土壤容重和含水率等因素对土壤碳氮磷生态化学计量特征的贡献率较高,其中土壤容重与 SOC、TN、TP 含量及 C/N、C/P 呈现极显著负相关关系($P<0.01$),这与王维奇等[16]对闽江河口芦苇湿地土壤 SOC、TN、TP 化学计量比与影响因子关系的研究结果相似。土壤容重影响着植物根系生长和凋落物分解,进而影响元素在土壤中的运移和积累,土壤容重小则土壤疏松,有利于水分渗透以及元素在土壤中累积。研究区土壤含水率则与土壤 SOC、TN、TP 含量及 C/N、C/P、N/P 呈正相关关系。这与李红林等[36]和肖烨等[44]在沙漠绿洲和山地沼泽土壤中的研究结果相似,均表明土壤水分对土壤系统元素运移及循环具有重要作用。研究区土壤电导率与 SOC、TN、TP 含量呈显著正相关($P<0.05$),与 C/N、C/P 和 N/P 呈负相关,但相关性不显著,这与王燕等[45]得出荒漠绿洲土壤电导率与 SOC、TN 含量呈极显著负相关的结果存在差异($P<0.01$)。主要因为研究区采样点布设针对的是旱地,均位于耕作田块,且受长期耕作和施肥等活动的影响,并没有中、重度盐碱地。虽然在吉林省旱作区西部个别采样点土壤电导率相对较高,达到 600 μS/cm,但整体变化范围较小,无明显盐渍化,因此对土壤碳氮磷生态化学计量特征的负面影响较小。另外,由于本研究只获取了土壤电导率参数,没有具体分析土壤中各种可溶性盐阳离子和阴离子含量及其与 SOC、TN、TP 含量的关系,因此还有待进一步探讨。本研究中发现,土壤 pH 值虽然与 SOC、TN、TP 含量及 C/N、C/P 呈负相关关系,但除与 SOC 含量外,均不显著,这与张晗等[41]得出南方旱地土壤 pH 值与 SOC、TN、TP 含量及 C/N、N/P 呈极显著负相关($P<0.01$)的研究结果存在差异。原因一方面是研究区土壤 pH 值整体偏碱性,且变异性较小,其次是研究区域土壤碳氮磷生态化学计量特征的空间变异性较大,不同采样点的成土母质、区域环境不同,导致同一土壤指标在研究区的变化趋势存在差异。

4 结论

(1)东北旱作区土壤 SOC、TN、TP 含量的平均值均处于中等水平,且彼此间存在显著正相关关系;土壤 C/N、C/P、N/P 的平均值均低于全国农田土壤平均值。从空间分布来看,研究区土壤 SOC、TN、TP 含量均呈现由西南向东北递增的趋势,SOC、TN 含量的空间变化具有高度一致性。土壤 C/N、C/P 的高值区主要分布在黑龙江省旱作区,而低值区位于吉林省和辽宁省旱作区,N/P 虽然较高,但整体分布均低于全国农田土壤平均值。

(2)东北旱作区土壤碳氮磷生态化学计量特征受到土地利用强度、施肥等人为活动和气温、土壤容重、含水率、质地等因素综合作用的影响。化肥的高强度施用是研究区土壤 C/N 较低的主要原因,尤其在吉林省和辽宁省旱作区,应降低氮素的投入,促进秸秆还田和农户合理施肥;土壤 TP 含量的整体平均值较高,在局部土壤 pH 值较低的地区,需关注磷的有效性。除人为因素影响外,土壤容重和含水率是影响研究区土壤碳氮磷生态化学计量特征分布规律的主要环境因子。

参 考 文 献

[1] 王绍强,于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3937 – 3947.
WANG Shaoqiang, YU Guirui. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus element [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 3937 – 3947. (in Chinese)

[2] 林永静,武梦娟,卢同平,等. 中国生态化学计量学研究热点的可视化分析[J]. 生物学杂志, 2018, 35(2): 63 – 66.
LIN Yongjing, WU Mengjuan, LU Tongping, et al. The visualization analysis of the ecological stoichiometry research based on the CiteSpace[J]. Journal of Biology, 2018, 35(2): 63 – 66. (in Chinese)

[3] 冯德枫,包维楷. 土壤碳氮磷化学计量比时空格局及影响因素研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2017, 23(2): 400 – 408.
FENG Defeng, BAO Weikai. Review of the temporal and spatial patterns of soil C: N: P stoichiometry and its driving factors [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2017, 23(2): 400 – 408. (in Chinese)

[4] LI Yuefen, LI Qingyu, GUO Dongyan, et al. Ecological stoichiometry homeostasis of *Leymus chinensis* in degraded grassland in western Jilin Province, NE China[J]. Ecological Engineering, 2016, 90: 387 – 391.

[5] ZENG Quanchao, LIU Yang, FANG Ying, et al. Impact of vegetation restoration on plants and soil C: N: P stoichiometry on the Yunwu Mountain Reserve of China[J]. Ecological Engineering, 2017, 109: 92 – 100.

[6] 曹祥会,龙怀玉,周脚根,等. 中温-暖温带表土碳氮磷生态化学计量特征的空间变异性——以河北省为例[J]. 生态学报, 2017, 37(18): 6053 – 6063.
CAO Xianghui, LONG Huaiyu, ZHOU Jiaogen, et al. Spatial variation of ecological stoichiometry characteristics of topsoil carbon, nitrogen and phosphorus in Hebei Province, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(18): 6053 – 6063. (in Chinese)

[7] 卢同平,张文翔,牛洁,等. 典型自然带土壤氮磷化学计量空间分异特征及其驱动因素研究[J]. 土壤学报, 2017, 54(3): 682 – 692.
LU Tongping, ZHANG Wenxiang, NIU Jie, et al. Study on spatial variability and driving factors of stoichiometry nitrogen and phosphorus in soils of typical natural zone of China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(3): 682 – 692. (in Chinese)

[8] CAO Yang, ZHANG Ping, CHEN Yunming. Soil C: N: P stoichiometry in plantations of N-fixing black locust and indigenous pine, and secondary oak forests in Northwest China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2018, 18(4): 1478 – 1489.

[9] 杨文,周脚根,王美慧,等. 亚热带丘陵小流域土壤碳氮磷生态计量特征的空间分异性[J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1336 – 1344.
YANG Wen, ZHOU Jiaogen, WANG Meihui, et al. Spatial variation of ecological stoichiometry of soil C, N and P in a small hilly watershed in subtropics of China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(6): 1336 – 1344. (in Chinese)

[10] 曾全超,李鑫,董扬红,等. 陕北黄土高原土壤性质及其生态化学计量的纬度变化特征[J]. 自然资源学报, 2015, 30(5): 870 – 879.
CENG Quanchao, LI Xin, DONG Yanghong, et al. Ecological stoichiometry characteristics and physical-chemical properties of soils at different latitudes on the Loess Plateau[J]. Journal of Natural Resource, 2015, 30(5): 870 – 879. (in Chinese)

[11] FANELLI G, LESTINI M, SAULI A S. Floristic gradients of herbaceous vegetation and P/N ratio in soil in a Mediterranean area[J]. Plant Ecology, 2007, 194(2): 231 – 242.

[12] 魏卫东,刘育红,马辉,等. 三江源区高寒草甸土壤与草地退化关系冗余分析[J]. 生态科学, 2018, 37(3): 35 – 43.
WEI Weidong, LIU Yuhong, MA Hui, et al. Redundancy analysis of relationships between soil and grassland degradation on alpine meadow in the source region of Three Rivers[J]. Ecological Science, 2018, 37(3): 35 – 43. (in Chinese)

[13] 王霖娇,汪攀,盛茂银. 西南喀斯特典型石漠化生态系统土壤养分生态化学计量特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2018, 38(18): 6580 – 6593.
WANG Linjiao, WANG Pan, SHENG Maoyin. Stoichiometric characteristics of soil nutrient elements and its influencing factors in typical karst rocky desertification ecosystems, Southwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(18): 6580 – 6593. (in Chinese)

[14] 陈印平,夏江宝,赵西梅,等. 黄河三角洲典型人工林土壤碳氮磷化学计量特征[J]. 土壤通报, 2017, 48(2): 392 – 398.
CHEN Yinping, XIA Jiangbao, ZHAO Ximei, et al. Effect of different plantation types on soil ecological stoichiometry in Yellow Delta[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(2): 392 – 398. (in Chinese)

[15] 靖磊,周延,吕偲,等. 洞庭湖湿地 3 个林龄杨树人工林叶与土壤碳氮磷生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2018, 38(18): 6530 – 6538.
JING Lei, ZHOU Yan, LÜ Si, et al. Characterization of the soil and leaf C, N and P stoichiometry of poplar plantations of three different stand ages in Dongting lake wetland, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(18): 6530 – 6538. (in Chinese)

[16] 王维奇,王纯,曾从盛,等. 闽江河口不同河段芦苇湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2012, 32(13): 4087 – 4093.
WANG Weiqi, WANG Chun, CENG Congsheng, et al. Soil carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometry of *Phragmites australis* wetlands in different reaches in Minjiang River estuary[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(13): 4087 – 4093. (in Chinese)

[17] YANG Zhenan, ZHU Qiuan, ZHAN Wei, et al. The linkage between vegetation and soil nutrients and their variation under different grazing intensities in an alpine meadow on the eastern Qinghai – Tibetan Plateau[J]. Ecological Engineering, 2018, 110: 128 – 136.

[18] MÜLLER M, OELMANN Y, SCHICKHOFF U, et al. Himalayan treeline soil and foliar C: N: P stoichiometry indicate

nutrient shortage with elevation[J]. Geoderma, 2017, 291: 21 - 32.
[19] QU Fanzhu, YU Junbao, DU Siyao, et al. Influences of anthropogenic cultivation on C, N and P stoichiometry of reed-dominated coastal wetlands in the Yellow River delta[J]. Geoderma, 2014, 235 - 236: 227 - 232.
[20] FAN Fan, HENRIKSEN C B, PORTER J. Relationship between stoichiometry and ecosystem services: a case study of organic farming systems[J]. Ecological Indicators, 2018, 85: 400 - 408.
[21] 孙立青. 中国农田土壤碳氮磷化学计量特征的研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
SUN Liqing, The study of farmland soil C: N: P stoichiometry characteristics in China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018. (in Chinese)
[22] LIU Xiang, MA Jie, MA Zhiwen, et al. Soil nutrient contents and stoichiometry as affected by land-use in an agro-pastoral region of Northwest China[J]. CATENA, 2017, 150: 146 - 153.
[23] 周晓兵,陶冶,吴林,等. 塔克拉玛干沙漠南缘荒漠绿洲过渡带不同土地利用影响下土壤化学计量特征[J]. 生态学报, 2019, 39(3): 1 - 11.
ZHOU Xiaobing, TAO Ye, WU Lin, et al. Soil stoichiometry in different land-use categories in desert-oasis ecotones of the southern Taklimakan desert[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(3): 1 - 11. (in Chinese)
[24] YU Zaipeng, WANG Minhuang, HUANG Zhiqun, et al. Temporal changes in soil C - N - P stoichiometry over the past 60 years across subtropical China[J]. Global Change Biology, 2017, 24(3): 1308 - 1320.
[25] ALVAREZ R, GIMENEZ A, CAFFARO M M, et al. Land use affected nutrient mass with minor impact on stoichiometry ratios in pampean soils[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2018, 110(2): 257 - 276.
[26] 贡璐,李红林,刘雨桐,等. N、P 施肥对塔里木河上游绿洲棉花 C、N、P 生态化学计量特征的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(22): 7689 - 7697.
GONG Lu, LI Honglin, LIU Yutong, et al. Effects of nitrogen and phosphorus fertilizers on carbon nitrogen, and phosphorus stoichiometry of oasis cotton in the upper reaches of Tarim River, Xinjiang, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(22): 7689 - 7697. (in Chinese)
[27] 王合玲,张辉国,吕光辉. 艾比湖流域土壤有机质与土壤因子响应关系的空间非平稳性分析[J]. 水土保持研究, 2016, 23(2): 224 - 228.
WANG Heling, ZHANG Huiguo, LÜ Guanghui. Analysis spatial non-stationary relationships between soil organic matter and soil factors in Ebinur lake basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(2): 224 - 228. (in Chinese)
[28] 卓志清,兴安,孙忠祥,等. 东北旱作区农业生态系统协同发展与权衡分析[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(6): 892 - 902.
ZHUO Zhiqing, XING An, SUN Zhongxiang, et al. Synergies and trade-offs of agro-ecosystem in dry-farming areas in Northeast China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(6): 892 - 902. (in Chinese)
[29] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011.
[30] CAMBARDELLA C A, MOORMAN T B, NOVAK J M, et al. Field-scale variability of soil properties in central iowa soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58: 1501 - 1511.
[31] KRAVCHENKO A N. Influence of spatial structure on accuracy of interpolation methods[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67: 1564 - 1571.
[32] TIAN Hanqin, CHEN Guangsheng, ZHANG Chi, et al. Pattern and variation of C: N: P ratios in China' s soils: a synthesis of observational data[J]. Biogeochemistry, 2010, 98(1 - 3): 139 - 151.
[33] 张雅蓉,李渝,刘彦伶,等. 长期施肥对西南黄壤碳氮磷生态化学计量学特征的影响[J]. 土壤通报, 2016, 47(3): 673 - 680.
ZHANG Yarong, LI Yu, LIU Yanling, et al. Effect of long-term fertilization on ecological stoichiometry characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in southwest yellow soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47(3): 673 - 680. (in Chinese)
[34] 孙忠祥,李勇,赵云泽,等. 旱作区土壤有机碳密度空间分布特征与其驱动力分析[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 255 - 262.
SUN Zhongxiang, LI Yong, ZHAO Yunze, et al. Analysis on spatial distribution characteristics and driving forces of soil organic carbon density in dry farming region[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 255 - 262. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190128&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.028. (in Chinese)
[35] 吴崇书,章明奎. 长期不同施肥对茶园土壤碳氮磷构成的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(3): 578 - 583.
WU Chongshu, ZHANG Mingkui. Effects of long-term different fertilization on carbon, nitrogen and phosphorus pools in tea garden soils[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(3): 578 - 583. (in Chinese)
[36] 李红林,贡璐,朱美玲,等. 塔里木盆地北缘绿洲土壤化学计量特征[J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1345 - 1355.
LI Honglin, GONG Lu, ZHU Meiling, et al. Stoichiometric characteristics of soil in an oasis on northern edge of Tarim basin, China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(6): 1345 - 1355. (in Chinese)
[37] 张兴义,隋跃宇,张少良,等. 薄层农田黑土全量碳及氮磷钾含量的空间异质性[J]. 水土保持通报, 2008, 28(2): 1 - 5.
ZHANG Xingyi, SUI Yueyu, ZHANG Shaoliang, et al. Spatial heterogeneities of total carbon, nitrogen, phosphorus and potassium content in black thin-layer soil[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28(2): 1 - 5. (in Chinese)
[38] 江叶枫,叶英聪,郭熙,等. 江西省耕地土壤氮磷生态化学计量空间变异特征及其影响因素[J]. 土壤学报, 2017, 54(6): 1527 - 1539.
JIANG Yefeng, YE Yingcong, GUO Xi, et al. Spatial variability of ecological stoichiometry of soil nitrogen and phosphorus in farmlands of Jiangxi Province and its influencing factors[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(6): 1527 - 1539. (in Chinese)

(下转第 336 页)

[20] HERRERA-GOMEZ A, CANONICO-FRANCO M, RAMOS G. Aggregate formation and segregation of maize starch granules cooked at reduced moisture conditions[J]. Starch-Stärke, 2005,57(7):301 - 309.

[21] PEREZ-SANTOS D, VELAZQUEZ G, CANONICO-FRANCO M, et al. Modeling the limited degree of starch gelatinization [J]. Starch-Stärke, 2016,68(7/8):727 - 733.

[22] XUE Q, NEWMAN R K, NEWMAN C W. Effects of heat treatment of barley starches on in vitro digestibility and glucose responses in rats[J]. Cereal Chemistry, 1996,73(5):588 - 592.

[23] 王德培, 潘慧生. 干热处理对绿豆淀粉和豌豆淀粉化学组成的影响及其与粉丝品质的关系[J]. 浙江农业大学学报, 1997,23(增刊):49 - 53.
WANG Depei, PAN Huisheng. Effect of dry-air treatment on chemical compositions of mung bean starch and pea starch and eating quality of starch silk[J]. Journal of Zhejiang Agricultural University, 1997,23(Supp.):49 - 53. (in Chinese)

[24] 刘爽. 几种甜味剂、香味剂和饲料颜色对仔猪增重效果的影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.

[25] 冯永江, 吴艳芬. 饲料产品色差原因分析[J]. 饲料工业, 2001,22(4):35 - 36.

[26] LAN X, LIU P, XIA S, et al. Temperature effect on the non-volatile compounds of Maillard reaction products derived from xylose-soybean peptide system: further insights into thermal degradation and cross-linking[J]. Food Chemistry, 2010, 120(4):967 - 972.

[27] 李良, 周艳, 滕飞, 等. 射流空化对大豆蛋白美拉德反应及产物乳化特性的影响[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(8): 372 - 378.
LI Liang, ZHOU Yan, TENG Fei, et al. Effects of jet cavitation on Maillard reaction and conjugate structure and emulsifying properties of soy protein isolate[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(8):372 - 378. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190841&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.041. (in Chinese)

(上接第 268 页)

[39] 杨秀才. 碳磷比对土壤磷素有效性的影响研究进展[J]. 土壤科学, 2019, 7(1): 10 - 15.
YANG Xiucai. Research progress in the effect of C/P ratio on soil phosphorus availability[J]. Hans Journal of Soil Science, 2019, 7(1): 10 - 15. (in Chinese)

[40] SMITH V H. Effects of nitrogen: phosphorus supply ratios on nitrogen fixation in agricultural and pastoral ecosystems[J]. Biogeochemistry, 1992, 18(1): 19 - 35.

[41] 张晗,欧阳真程,赵小敏. 不同利用方式对江西省农田土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响[J]. 环境科学学报, 2019, 39(3): 1 - 12.
ZHANG Han, OUYANG Zhencheng, ZHAO Xiaomin. Effects of different land use types on ecological stoichiometry characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in farmland soils in Jiangxi Province, China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(3): 1 - 12. (in Chinese)

[42] AI Zemin, HE Lirong, XIN Qi, et al. Slope aspect affects the non-structural carbohydrates and C: N: P stoichiometry of *Artemisia sacrorum* on the Loess Plateau in China[J]. CATENA, 2017, 152: 9 - 17.

[43] 郭金瑞,宋振伟,彭宪现,等. 东北黑土区长期不同种植模式下土壤碳氮特征评价[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 178 - 185.
GUO Jinrui, SONG Zhenwei, PENG Xianxian, et al. Evaluation in soil carbon and nitrogen characteristics under long-term cropping regimes in black soil region of Northeast China[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6): 178 - 185. (in Chinese)

[44] 肖烨,商丽娜,黄志刚,等. 吉林东部山地沼泽湿地土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量学特征[J]. 地理科学, 2014, 34(8): 994 - 1001.
XIAO Ye, SHANG Li'na, HUANG Zhigang, et al. Ecological stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus in mountain swamps of eastern Jilin Province[J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(8): 994 - 1001. (in Chinese)

[45] 王燕,赵哈林,董治宝,等. 荒漠绿洲农田盐渍化过程中土壤环境的演变过程[J]. 生态环境学报, 2014, 23(11): 1744 - 1751.
WANG Yan, ZHAO Halin, DONG Zhibao, et al. Change of soil physico-chemical characteristics in farmland salinization in arid oasis[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(11): 1744 - 1751. (in Chinese)