

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.11.017

基于 Geo - D 的陕西省 STN 空间变异因子交互影响

王琦 常庆瑞 黄勇 史博太 落莉莉

(西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 以陕西省为研究区,应用地理探测器模型,揭示了不同气候区域土壤全氮(STN)空间变异与自然、人文环境的内在联系。结果表明:陕西省 STN 表现出中等变异强度,平均含量为 0.91 g/kg。STN 含量总体呈现南高北低的特性,秦巴区 STN 平均含量最高,为 1.40 g/kg;蒙中区最低,为 0.37 g/kg。整体上,STN 含量变异受自然因素影响程度高于人文因素。其中,土壤有机质含量的单因子影响力最大(q 为 0.63 ~ 0.86),其次为县级行政区划(q 为 0.13 ~ 0.67)。其它因素中,陕西省市级行政区划、日照时长单因子影响力较大, q 均达到 0.50 以上;秦巴区与蒙中区土壤亚类影响力最大(q 为 0.22 ~ 0.30);渭河区市级行政区划单因子影响程度最高(q 为 0.31);晋陕甘区与蒙东区影响力最大因子分别为化肥施用量(q 为 0.47)、有效磷含量(q 为 0.26)。各因子对 STN 含量变异存在交互作用,交互影响力较单因子有所提升,表现出互相增强或非线性增强效应。

关键词: 土壤全氮含量;空间变异;陕西省;影响因子;地理探测器模型

中图分类号: S153.6⁺2; S158

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2021)11-0161-09

OSID:



Driving Factors and Interaction of STN Spatial Variation in Shaanxi Province Based on Geo - D

WANG Qi CHANG Qingrui HUANG Yong SHI Botai LUO Lili

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The relationship between the spatial variation of soil total nitrogen (STN) and the natural and human environment in different climatic regions was revealed by using geographic detector model, a method of spatial counting to detect spatial variation and identify the driving factors, in Shaanxi Province. The results showed that the STN content was generally high in the south and low in the north, and presented a moderate intensity of variation in the 2020s, with an average content of 0.91 g/kg. The average STN content in Qinba District was the highest (1.40 g/kg), and the lowest (0.37 g/kg) in Central Mongolia. On the whole, STN variation was more affected by natural factors than human factors, and influenced by the single factor of soil organic matter content (q value of 0.63 ~ 0.86) mainly, and secondly the county-level administrative divisions (q value of 0.13 ~ 0.67). Among other factors, the city-level administrative division and the duration of sunshine were more influential in Shaanxi Province, q value both reached more than 0.50; in Qinba District and Central Mongolia District, the higher driving factor was the soil subtypes (q value of 0.22 ~ 0.30); the degree of influence of municipal administrative division was the highest (q value of 0.31) in Weihe District; the fertilizer application in Shanxi - Shaanxi - Gansu had the greatest influence (q value of 0.47); and the available phosphorus content (q value of 0.26) in the eastern Inner Mongolia was the higher driving factor on STN variation. The influence of factors was interactive on the variation of STN, the synergistic effect of the STN showed mutual enhancement or non-linear enhancement and the interaction of the two factors enhanced the influence of the single factor on STN.

Key words: soil total nitrogen content; spatial variation; Shaanxi Province; driving factor; geographic detector model

收稿日期: 2020-11-20 修回日期: 2021-01-11

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2452017108)和国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2013AA102401-2)

作者简介: 王琦(1994—),女,博士生,主要从事土地资源与空间信息技术研究,E-mail: wangqieducation@nwsuaf.edu.cn

通信作者: 常庆瑞(1959—),男,教授,博士生导师,主要从事土地资源与空间信息技术研究,E-mail: changqr@nwsuaf.edu.cn

0 引言

土壤全氮(Soil total nitrogen, STN)含量是影响耕地质量及作物生长的重要指标,也是全球氮循环的重要源和汇^[1-2]。受土壤环境与外部环境波动相互作用,STN表现出空间异质性^[3]。研究STN与环境因子之间的关系,是科学认识耕地质量的基础,对指导作物生产具有重要意义^[4]。传统的相关性分析、多元回归分析、地统计等方法被用于揭示STN与影响因子的内在联系。文献[5]通过多元回归分析发现,新疆伊犁河谷地区土壤碳氮比与STN呈极显著正相关,地理气候因子和土壤理化性质可以独立解释土壤碳氮比的26.8%和55.4%的空间特征,而人类活动只能独立解释5.4%的空间特征。文献[6]结合方差与地统计学分析发现仁寿县土壤母质、土壤类型、土地利用类型、地形因子和植被盖度对土壤氮素的空间变化有显著影响。文献[7-8]采用方差分析、线性回归分析表明休耕、轮作等措施可提高STN含量。上述研究方法均需假设环境因子对土壤属性空间分布的影响为线性平稳,但STN是在复杂环境因子的响应中形成的,此类假设的结果可能与土壤属性的实际空间分布不相符。另外,以往学者多侧重于研究STN与环境因素中单因子的响应关系,而忽略了环境因素中各因子间交互作用对STN的影响。

地理探测器(Geographic detector model, Geo-D)是一种度量事物空间分异性及驱动因素影响力的统计方法,无线性假设和约束条件,可有效克服传统统计分析方法在处理地理空间数据及分类变量问题上的局限性^[9-10],已广泛应用于生态^[11]、地质^[12]、污染^[13]等方面的研究。但目前应用该方法进行STN空间变异驱动力的研究较少,如文献[14]利用地理探测器研究黄河上游高寒草地,表明STN空间异质性分布主要受海拔、坡度、降水量等因子影响,同时揭示了影响因子间的交互作用;文献[15]以陕西省宝鸡市农田土壤养分数据为基础,借助地理探测器研究发现各养分空间变异的主导因子存在一定差异,但尚未见对陕西省全域STN空间异质性主要控制因子进行研究的报道。因此,本文应用地理探测器模型,以陕西省耕地STN含量为研究对象,探讨陕西省全域及子气候区STN含量受自然因素与人文因素的影响程度,以深入理解陕西省STN含量的关键环境控制因子,并揭示环境因子间复杂结合机制对STN空间变异的影响,以期今后指导作物生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

陕西省地处 $105^{\circ}29' \sim 111^{\circ}15' E$ 、 $31^{\circ}42' \sim 39^{\circ}35' N$ 之间,面积为 $2.056 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。全省南北狭长,东西窄,地势南北高,主要为山地和高原,中部低,为汉中盆地。土壤类型丰富,共22个土类,49个亚类,其中农田土壤以黑垆土、黄绵土、褐土、黄褐土、黄棕壤等土类为主。气候南北差异明显,由南到北依次为北亚热带、暖温带、中温带,结合干燥度、地形、行政区划细分为秦巴区、渭河区、晋陕甘区、蒙中区、蒙东区等5个子气候区。全省气温由南向北、自东向西逐步降低;降水量呈现南高北低的趋势,受山地地形影响比较显著。

1.2 数据来源及指标选取

土壤采样点实测数据采用陕西省2015—2018年间耕地质量监测点调查数据,共4953个采样点(图1);施肥信息来源于2015—2018年间陕西省和各市(区)统计年鉴资料;高程数据采用30 m SRTM(Shuttle radar topography mission, <https://www.usgs.gov/>);土壤图采用陕西省1:50 000县级单位土壤图和1:500 000陕西省土壤图;还包括气候区划图、地貌类型图以及气象数据,均来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)。

STN受自然因素与人文因素共同作用。自然因素方面,已有学者研究表明STN受气温、降水量、土壤类型、成土母质、地形、高程等因子影响^[6,16-17]。

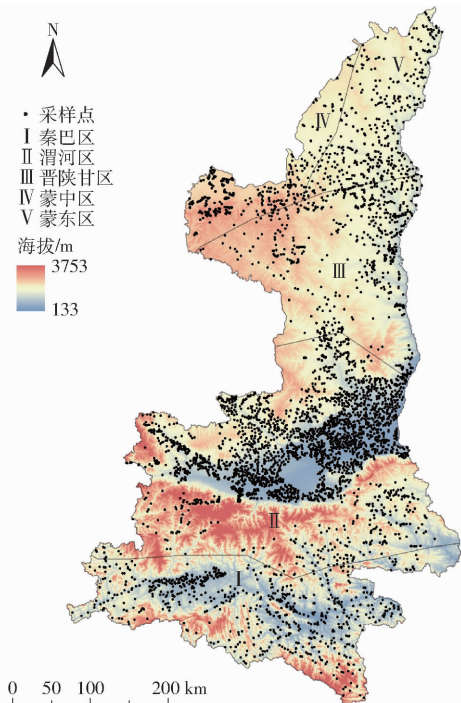


图1 土壤采样点分布图

Fig. 1 Soil sampling sites distribution map

同时,耕作模式、施肥管理、作物体系等对 STN 具有显著影响^[18-19]。因此,为充分考虑多因子构成的有机整体对 STN 的影响,选取自然因素(气候、地貌、海拔、土壤等)、人文因素(行政区划、熟制、施肥量

等)两大类,共 21 个影响因子(表 1),并利用自然断点法,对数值型驱动因子进行等级划分(表 2),探测不同因素对 STN 变化的影响。其中,肥料施用量为每公顷肥料施用折纯量。

表 1 因子指标

Tab.1 Indicators of factors

类型	因子	指标	单位	类型	因子	指标	单位
气候(A)	A ₁	日照时长	h	行政区划(F)	F ₁	市级行政区划	
	A ₂	降水量	mm		F ₂	县级行政区划	
	A ₃	10℃以上积温	℃	人文因素	G ₁	熟制	
地貌(B)	B	地貌类型	G ₂		化肥施用量	kg/hm ²	
海拔(C)	C	海拔	m		G ₃	氮肥施用量	kg/hm ²
自然因素	土壤属性(D)	D ₁	成土母质		G ₄	磷肥施用量	kg/hm ²
		D ₂	土类		G ₅	钾肥施用量	kg/hm ²
		D ₃	亚类		G ₆	复合肥施用量	kg/hm ²
土壤养分(E)	E ₁	SOM 质量比	g/kg	耕作措施(G)			
	E ₂	碳氮比					
	E ₃	pH 值					
	E ₄	AP 质量比	mg/kg				
	E ₅	AK 质量比	mg/kg				

注: SOM 表示有机质(Soil organic matter); AP 表示有效磷(Available phosphorus); AK 表示速效钾(Available potassium)。

表 2 因子分级标准

Tab.2 Classification criterion of factors

因子	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A ₁ /h	>2 564	2 391 ~ 2 564	2 197 ~ 2 391	2 027 ~ 2 197	1 884 ~ 2 027	1 713 ~ 1 884	0 ~ 1 713			
A ₂ /mm	>913. 0	802. 9 ~ 913. 0	700. 0 ~ 802. 9	622. 8 ~ 700. 0	568. 3 ~ 622. 8	515. 9 ~ 568. 3	448. 6 ~ 515. 9	0 ~ 448. 6		
A ₃ /℃	>4 323	4 207 ~ 4 323	4 057 ~ 4 207	3 837 ~ 4 057	3 672 ~ 3 837	3 492 ~ 3 672	3 302 ~ 3 492	2 994 ~ 3 302	2 587 ~ 2 994	0 ~ 2 587
C/m	0 ~ 454	454 ~ 590	590 ~ 726	726 ~ 864	864 ~ 1 000	1 000 ~ 1 132	1 132 ~ 1 279	1 279 ~ 1 457	1 457 ~ 1 674	>1 674
E ₁ /(g·kg ⁻¹)	>40	30 ~ 40	25 ~ 30	20 ~ 25	15 ~ 20	10 ~ 15	5 ~ 10	0 ~ 5		
E ₂	>30. 15	14. 96 ~ 30. 15	12. 43 ~ 14. 96	11. 34 ~ 12. 43	10. 07 ~ 11. 34	9. 32 ~ 10. 07	8. 65 ~ 9. 32	7. 62 ~ 8. 65	6. 10 ~ 7. 62	0 ~ 6. 10
E ₃	0 ~ 6	6 ~ 7	7 ~ 8	8 ~ 9	>9					
E ₄ /(mg·kg ⁻¹)	>50	40 ~ 50	30 ~ 40	20 ~ 30	15 ~ 20	10 ~ 15	5 ~ 10	0 ~ 5		
E ₅ /(mg·kg ⁻¹)	>300	250 ~ 300	200 ~ 250	150 ~ 200	100 ~ 150	60 ~ 100	30 ~ 60	0 ~ 30		
G ₂ /(kg·hm ⁻²)	>2 812. 5	1 948. 5 ~ 2 812. 5	1 285. 5 ~ 1 948. 5	990. 0 ~ 1 285. 5	777. 0 ~ 990. 0	552. 0 ~ 777. 0	337. 5 ~ 552. 0	196. 5 ~ 337. 5	109. 5 ~ 196. 5	0 ~ 109. 5
G ₃ /(kg·hm ⁻²)	>750. 0	567. 0 ~ 750. 0	438. 0 ~ 567. 0	330. 0 ~ 438. 0	246. 0 ~ 330. 0	202. 5 ~ 246. 0	169. 5 ~ 202. 5	121. 5 ~ 169. 5	75. 0 ~ 121. 5	0 ~ 75. 0
G ₄ /(kg·hm ⁻²)	>190. 5	135. 0 ~ 190. 5	93. 0 ~ 135. 0	64. 5 ~ 93. 0	42. 0 ~ 64. 5	28. 5 ~ 42. 0	19. 5 ~ 28. 5	15. 0 ~ 19. 5	9. 0 ~ 15. 0	0 ~ 9. 0
G ₅ /(kg·hm ⁻²)	>349. 5	235. 5 ~ 349. 5	139. 5 ~ 235. 5	109. 5 ~ 139. 5	69. 0 ~ 109. 5	45. 0 ~ 69. 0	25. 5 ~ 45. 0	18. 0 ~ 25. 5	4. 5 ~ 18. 0	0 ~ 4. 5
G ₆ /(kg·hm ⁻²)	>1 971. 0	1 059. 0 ~ 1 971. 0	687. 0 ~ 1 059. 0	459. 0 ~ 687. 0	285. 0 ~ 459. 0	157. 5 ~ 285. 0	108. 0 ~ 157. 5	62. 3 ~ 108. 0	36. 0 ~ 62. 3	0 ~ 36. 0

1.3 研究方法

1.3.1 经典统计学

采用经典统计学参数最大值(Max)、最小值

(Min)、平均值(Mean)、标准偏差(Standard deviation, SD)和变异系数C_v描述陕西省全域及子气候区 STN 的分布特征。其中变异系数采用

Nielsen(1985)划分标准,当 $C_v \leq 10\%$ 时,为弱变异, $10 < C_v \leq 100\%$ 时,为中等变异强度; $C_v > 100\%$ 时,为强变异^[20]。

1.3.2 地理探测器

地理探测器是揭示因子影响力的一种空间归因方法,采用因子探测与交互作用探测器探讨陕西省 STN 驱动因素单因子影响力及交互作用^[9]。

(1) 因子探测

探测影响因子 X 对陕西省全域及子气候区 STN 空间分异的解释程度,度量指标为 q 值,其赋值公式为

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2}$$

式中 N_h ——子类型区 h 的单元数

N ——全区的单元数

σ_h^2 ——STN 含量在子类型区 h 的方差

σ^2 ——STN 含量在全区的方差

q 值为因子对 STN 的影响力,值域为 $[0, 1]$, 值越大表明因子与 STN 空间分布越一致,因子的影响力越强。

(2) 交互探测

交互作用探测器模型用于识别不同影响因子 X 之间的交互作用,评估因子 X_1 与 X_2 对 STN 含量的复合影响力较单因子影响力呈相互独立或增加或减弱效应。首先分别计算两种因子 X_1 、 X_2 的 q 值;然后叠加两个因子图层,并计算 $X_1 \cap X_2$ 的 q 值,最后对数值 $q(X_1)$ 、 $q(X_2)$ 、 $q(X_1 \cap X_2)$ 进行比较分析,判断其交互作用(表 3)。

表 3 双因子交互作用类型

Tab.3 Two-factor interaction types

判断依据	交互作用
$q(X_1 \cap X_2) < \min(q(X_1), q(X_2))$	非线性减弱
$\min(q(X_1), q(X_2)) < q(X_1 \cap X_2) < \max(q(X_1), q(X_2))$	单因子非线性减弱
$q(X_1 \cap X_2) > \max(q(X_1), q(X_2))$	双因子增强
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强

2 结果与分析

2.1 陕西省 STN 含量统计分析

陕西省 STN 平均含量(质量比)为 0.91 g/kg(表 4),空间分布总体呈现南高北低的特性。各子气候区中,秦巴区 STN 含量均值最高,为 1.40 g/kg,蒙中区最低(0.37 g/kg),按照陕西省第二次土壤普查全氮分级标准,分别为第 3 级、第 7 级;其它区域从大到小依次为渭河区、晋陕甘区、蒙东区,与第二

次土壤普查结果趋势一致^[21]。研究区 STN 均表现出中等变异强度。其中,晋陕甘区、蒙东区 STN 变异系数较高,均超过 50%,表明这些区域人类活动对 STN 的影响力较其它气候区高。

表 4 陕西省 STN 含量描述性统计

Tab.4 Descriptive statistics of STN content in Shaanxi Province

区域	质量比/(g·kg ⁻¹)				变异系数/%
	最大值	最小值	平均值	标准差	
陕西省	3.00	0.07	0.91	0.47	51.65
秦巴区	2.93	0.14	1.40	0.51	36.43
渭河区	3.00	0.14	1.02	0.35	34.31
晋陕甘区	2.06	0.08	0.52	0.28	53.85
蒙中区	1.39	0.07	0.37	0.17	45.95
蒙东区	2.67	0.07	0.41	0.25	60.98

2.2 因子探测分析

整体上,研究区 STN 驱动因子的影响力 q 值差异较大(图 2),其中秦巴区 A_2 、 B 、 C ,渭河区 C ,晋陕甘区 A_2 、 D_1 ,蒙中区 A_3 、 B 、 E_2 、 E_5 、 F_1 、 G_1 ,蒙东区 B 、 C 、 D_1 、 D_2 、 D_3 、 E_2 、 E_3 、 G_2 、 G_3 、 G_4 、 G_5 、 G_6 等因子的单因素影响力 q 值未通过 0.05 显著性检验。SOM 含量单因子影响力最大(0.63~0.86),县级行政区划(0.13~0.67)次之。不同区域中,驱动因子影响力从大到小依次为陕西省(0.10~0.80)、晋陕甘区(0.05~0.70)、秦巴区(0.04~0.80)、渭河区(0.03~0.63)、蒙中区(0.10~0.86)、蒙东区(0.04~0.79)。

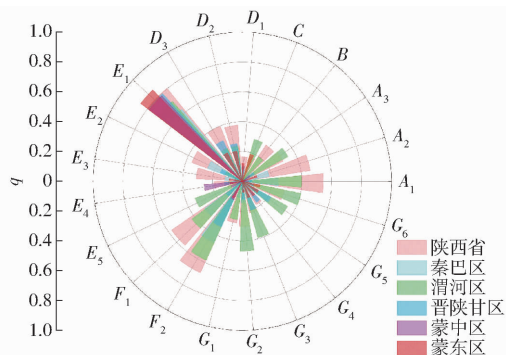


图 2 陕西省不同气候区驱动因子的 q 值

Fig.2 q values of driving factors in different climatic zones

全省范围内影响 STN 含量变异的主导因子为 SOM 含量(0.80)、县级行政区划(0.67)、市级行政区划(0.58)、日照时长(0.54)、降水量(0.46)、亚类(0.40),解释力均达到 40% 以上。各区域中,秦巴区 STN 含量主要受 SOM 含量(0.80)、县级行政区划(0.34)、亚类(0.30)以及土类(0.26)等因子影响。渭河区 STN 含量变异主导因子为 SOM 含量(0.63)、县级行政区划(0.45)、市级行政区划(0.31)、碳氮比(0.25)、日照时长(0.24)、降水量

(0.18) 等。SOM 含量 (0.71)、县级行政区划 (0.58)、化肥施用量 (0.47)、市级行政区划 (0.42)、复合肥施用量 (0.40)、日照时长 (0.40) 等是晋陕甘区 STN 含量变异的主要驱动因子。蒙东区 STN 含量则主要受 SOM 含量 (0.79)、AP 含量 (0.26) 以及县级行政区划 (0.14) 影响,其它因子的解释力均低于 0.10。蒙中区的主导影响因子为 SOM 含量 (0.85)、亚类 (0.22) 及土类 (0.21)。综上,研究区 STN 含量受自然因素影响总体高于人文因素。仅晋陕甘区受自然因素影响和人文因素影响均相对较大,表明该区域受人类活动影响程度高。

2.3 交互作用分析

驱动因子对 STN 空间变异的复合影响力较单因子均有所提升,表现出互相增强或非线性增强效应(图 3、4)。

2.3.1 自然因素交互作用分析

不同气候区中,自然因素因子间的交互作用有所差异(图 3a~3d)。其中,SOM 含量与其它自然因子的交互影响力较高,最高值均为 SOM 含量交互碳氮比,可解释 STN 含量 88%~96% 的变异。此外,陕西省内日照时长与亚类 (0.62)、日照时长与碳氮比 (0.61)、日照时长与土类 (0.60),渭河区内碳氮比与亚类 (0.42)、碳氮比与地貌类型 (0.39)、碳氮比与土类 (0.39),秦巴区内亚类与地貌类型 (0.45)、亚类与海拔 (0.44)、亚类与 AP 含量 (0.44)、亚类与 10℃ 以上积温 (0.44),晋陕甘区内 AK 含量与 10℃ 以上积温 (0.61)、AK 含量与地貌类

型 (0.60)、AK 含量与碳氮比 (0.59),蒙东区内 AP 含量与碳氮比 (0.50)、AP 含量与地貌类型 (0.50)、AP 含量与亚类 (0.38),以及蒙中区海拔与亚类 (0.40)、海拔与土类 (0.40) 等因子的交互影响力在区域内均较高。结果表明,自然因子间交互作用使秦巴区、渭河区、晋陕甘区及蒙东区内地貌类型对 STN 含量的影响力得以凸显。同时,SOM 含量与其它自然因子的交互作用,进一步表明 SOM 含量与 STN 含量关系密切。

2.3.2 人文因素交互作用分析

人文因素对 STN 空间变异的交互影响力从大到小为陕西省 (0.39~0.69)、晋陕甘区 (0.37~0.60)、渭河区 (0.19~0.49)、秦巴区 (0.14~0.37)、蒙中区 (0.08~0.13)、蒙东区 (0.02~0.14)。

研究区人文因素交互作用中,县级行政区划与其它人文因素的交互影响力较高(图 3e、3f),且除蒙东区与蒙中区外,其它气候区域县级行政区划与熟制的交互影响力最大 (0.37~0.69)。此外,陕西省与渭河区 STN 含量受市级行政区划与其它人文因子的交互影响力也较高;秦巴区内复合肥施用量与氮肥、钾肥、化肥施用量以及磷肥施用量与氮肥、钾肥、化肥施用量等因子的交互影响力均达到 0.30 以上;晋陕甘区受氮肥施用量与钾肥施用量 (0.58)、氮肥施用量与复合肥施用量 (0.57) 以及化肥施用量与熟制 (0.58)、化肥施用量与市级行政区划 (0.57) 等因子交互影响力较高;蒙中区内磷肥施

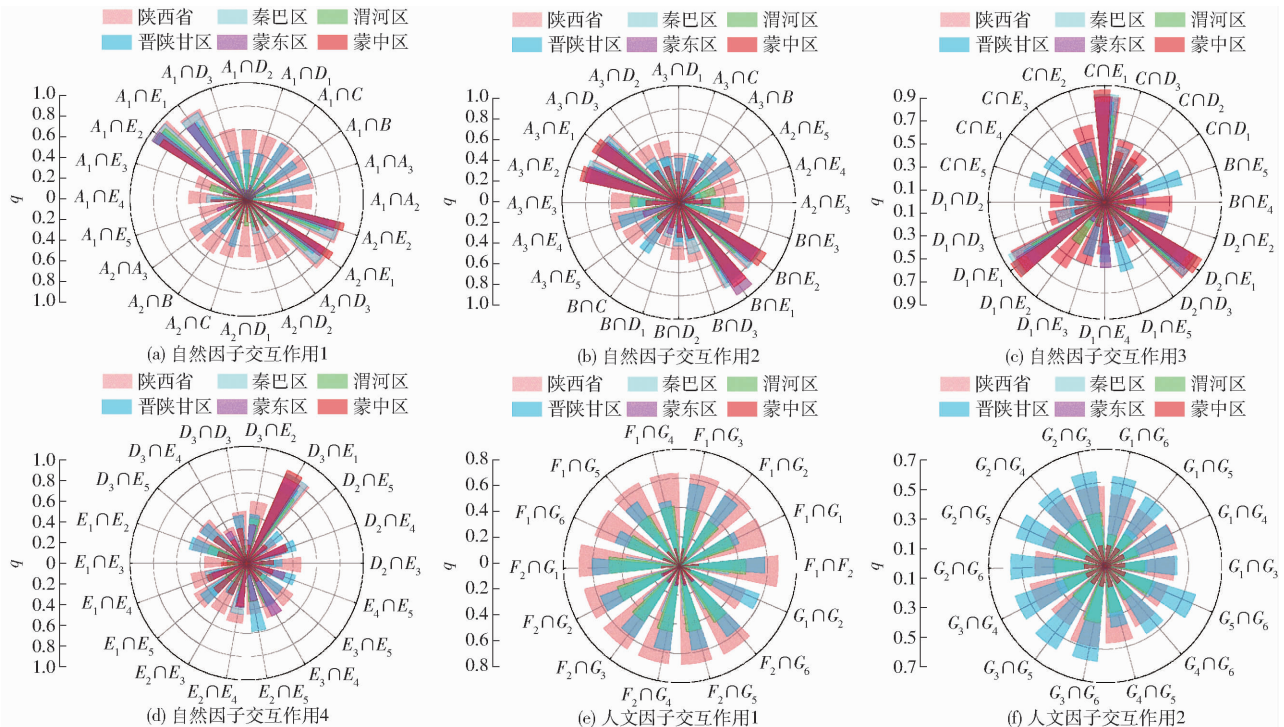


图 3 自然因子、人文因子交互作用探测

Fig. 3 Interaction detection of natural factors and human factors

用量与复合肥料用量交互作用以及钾肥施用量与磷肥施用量、熟制、市级行政区划、复合肥料用量等因子的交互作用力均达到 0.13 以上;蒙东区内其它人文因子交互影响力均较低。综上,人文因子对 STN 含量的影响力相互作用明显,且均表现出相互增强或非线性增强效应。

2.3.3 自然因素与人文因素交互作用分析

自然因素与人文因素交互作用中,SOM 含量与各人文因子的复合影响力较高(图 4),从大到小依次为蒙中区(0.86~0.88)、秦巴区(0.80~0.89)、陕西省(0.82~0.93)、晋陕甘区(0.78~0.86)、渭河区(0.66~0.86)、蒙东区(0.35~0.81)。此外,陕西省、秦巴区、渭河区、晋陕甘区及蒙东区内县级行政区划与 AP 含量交互影响力次之。其它因子中,陕西省、渭河区受县级行政区划与各自然因子的

复合影响力较高;秦巴区内亚类与钾肥、磷肥、氮肥、化肥施用量等因子的复合影响力均达到 0.40 以上;晋陕甘区内 AK 含量与化肥、钾肥、氮肥施用量以及 AP 含量与复合肥料、化肥施用量,海拔与复合肥料施用量以及碳氮比与化肥施用量等因子的复合影响力均介于 0.61~0.65 之间,对区域内 STN 含量具有较高的解释力;蒙东区内 AP 含量与各人文因子交互作用解释力均达到 0.30 以上;蒙中区内亚类与县级行政区划、磷肥施用量、钾肥施用量以及土类与县级行政区划的复合影响力均达到 0.34 以上。综上,各气候区 STN 含量受人文因素与自然因素交互影响力不同,但交互作用均表现出相互增强或非线性增强效应。因子间交互作用使陕西省、秦巴区、渭河区、晋陕甘区以及蒙东区内 AP 含量的影响力得以凸显。

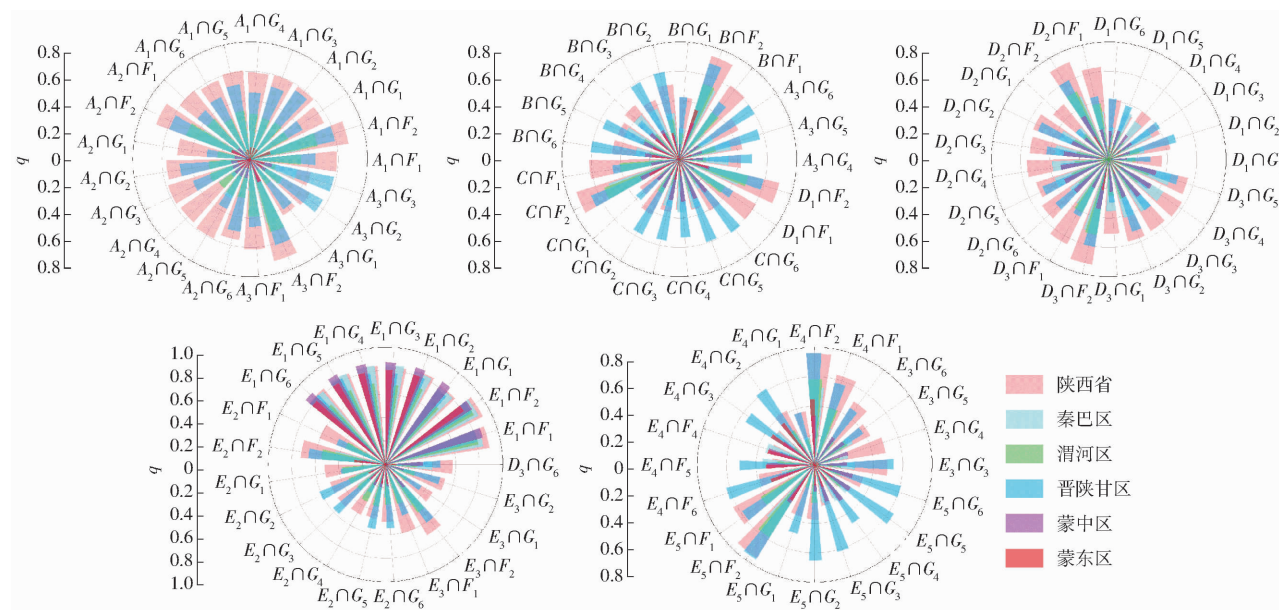


图 4 自然与人文因子交互作用探测

Fig. 4 Interaction detection between natural with human factors

3 讨论

3.1 气候

气候条件可以决定 STN 空间分布大格局,日照时长、积温与降水量通过影响区域水热平衡、地上植被光合作用、种植制度、作物分布等,进而影响 STN 含量^[6, 22]。陕西省跨越 3 个气候带、5 个二级气候区,区域间气候条件相差较大。且渭河区与晋陕甘区内日照时长差异较其它区域明显^[23],导致区域内该因子对 STN 含量影响程度较高。通常情况下,STN 含量随降水量的增加而增加^[24]。陕西省绝大部分农耕区在作物生长季内水分亏缺,以渭河区缺水最为突出,是全省的重旱区^[23],因而陕西省全域与渭河区 STN 含量空间异质性受降水量的影响较

其它区域高。各区域气候因素与其它驱动因子间的交互作用进一步增强了气候因素对 STN 含量空间分布的影响。

3.2 地貌类型

研究区地貌类型复杂多样,差异较大。不同地貌类型表现出不同的地形特征,而地形改变了水热条件和侵蚀过程的分布,导致近地表温度、蒸发需求和土壤湿度的差异,从而影响土壤属性、土壤类型、地上植被生长、土地利用方式以及土地管理措施,并最终影响 STN 含量^[14, 22]。秦巴区、渭河区、晋陕甘区以及蒙东区自然因素因子间交互作用使地貌类型对 STN 含量空间变化的影响力得以凸显,地貌类型与其它因子间交互作用表现出相互增强与非线性增强效应。

3.3 土壤类型

土壤类型对 STN 的空间变异有显著影响^[6,25]。研究区土壤类型丰富,渭河区主要以褐土、黄绵土为主;晋陕甘区与蒙东区主要为黄绵土;秦巴区土壤类型以水稻土、黄棕壤、黄褐土为主;蒙中区以风沙土、黄绵土为主。不同土壤类型间 STN 含量水平不一,水稻土由于独特的腐殖质累积特点^[21],具有较高的 SOM 与 STN 含量(1.74 g/kg);通常,黄棕壤较黄褐土空间分布区降水量多,具有较高的 STN 含量。风沙土多分布在陕西省北部风沙过渡区与黄土丘陵沟壑区北缘,风力搬运作用强烈,地上植被较难固定, SOM 与腐殖质积累困难^[26],STN 含量整体偏低(蒙中区:0.34 g/kg)。黄绵土多分布在地形破碎、坡度大及水土流失比较严重的黄土高原区,地上植被稀疏,虽经自然堆积与人类耕作、施肥等措施后,养分肥力有所提升^[21],但总体全氮含量依然偏低(蒙中区:0.38 g/kg)。综上,秦巴区与蒙中区内土壤类型间的差异对 STN 空间异质性影响较大。土类、亚类与日照时长、碳氮比、地貌、海拔、AP 含量等因子在不同区域的交互作用使得土类、亚类对区域内 STN 空间变异的影响力增强。

3.4 土壤养分

各气候区 SOM 含量对 STN 含量单因子影响力最高,且 SOM 含量与其它因子复合影响力也较高,二者关系密切,协同性强,与前人研究结果一致^[16,27-28]。此外,SOM 含量与碳氮比的交互作用可解释各气候区 STN 空间变异的 88%~96%,这是由于土壤碳氮比可调节 SOM 矿化进程从而对 STN 含量产生影响^[5,14]。晋陕甘区 AK 含量、蒙东区内 AP 含量与其它驱动因子的交互作用增强了 AK 含量、AP 含量对区域 STN 含量的影响。

3.5 行政区划

STN 含量受行政区划内农业政策、耕作、培肥模式等因素综合影响,导致其空间分布呈区域性特征^[20]。同时,在农田环境系统中,人类活动对土壤磷含量具有至关重要的作用^[29]。各气候区行政区划单因子影响力及其与 AP 含量交互作用对 STN 空间异质性影响较大,表明人文因素对 STN 的分布有重要影响。

3.6 耕作措施

研究区地形复杂、雨热资源差异大,耕作措施多样^[23]。采样点调查结果显示秦巴区作物耕作措施主要为一年两熟制,一年多熟与一熟也有少量分布;渭河区以一年两熟、一熟及多年生为主,有部分地区为两年三熟;晋陕甘区以一年一熟及常年生为主;蒙东区、蒙中区以一年一熟为主。其中多年生作物主要为苹果,两年三熟、一年两熟作物以小麦-玉米轮作为主,一年一熟以小麦、玉米、水稻、马铃薯为主。另外,果园比谷物类作物需要更高的施肥量,通常较高的肥料投入会提升土壤 STN 含量^[6,18]。同时,作物轮作措施也可提高土壤有机氮含量^[6,30]。研究区施肥量、熟制与其它因子的交互作用进一步增强了施肥量、熟制对 STN 含量的影响。

4 结论

(1)陕西省农田 STN 平均含量为 0.91 g/kg,总体呈现南高北低的特性。在各子气候区中,秦巴区 STN 平均含量最高,为 1.40 g/kg;蒙中区最低,为 0.37 g/kg。其它区域排序从大到小为渭河区、晋陕甘区、蒙东区。各气候区域 STN 含量表现出中等变异强度,可见在气候差异的基础上,人文因素与其它自然因素对 STN 含量也有影响。

(2)总体上,研究区 STN 空间变异受自然因素影响程度高于人文因素。其中,晋陕甘区人文因素影响较其他区域突出,在该区域内人类活动强烈,对 STN 含量变异影响程度较高。

(3)不同气候区域 STN 含量变异的主导驱动因子有所差异。其中,SOM 含量的单因子影响力最大(q 为 0.63~0.86),其次为县级行政区划(q 为 0.13~0.67)。其它因素中,陕西省全城市级行政区划、日照时长影响力较大,均达到 50% 以上;秦巴区与蒙中区均土壤亚类(q 为 0.22~0.30)影响最大;渭河区市级行政区划影响程度最高(q 为 0.31);晋陕甘区化肥施用量影响力最大(q 为 0.47);蒙东区 AP 含量(q 为 0.26)的影响力最大。

(4)驱动因子对 STN 变化的复合因子影响力较单因子均有所提升,表现出互相增强或非线性增强效应。

参 考 文 献

- [1] CHEN C R, XU Z H. Analysis and behavior of soluble organic nitrogen in forest soils[J]. Journal of Soils and Sediments, 2008, 8(6): 363-378.
- [2] YAN L, LI H, ZHANG J, et al. Response of organic nitrogen in black soil to long-term different fertilization and tillage practices in Northeast China[J]. Soil and Water Research, 2016, 11(2): 124-130.
- [3] LIU Y, LV J, ZHANG B, et al. Spatial multi-scale variability of soil nutrients in relation to environmental factors in a typical agricultural region, Eastern China[J]. Science of the Total Environment, 2013, 450-451: 108-119.
- [4] 杨建宇, 欧聪, 李琪, 等. 基于云模型的耕地土壤养分模糊综合评价[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 251-257.

- YANG Jianyu, OU Cong, LI Qi, et al. Fuzzy synthetic evaluation of soil nutrients in cultivated land based on cloud model in Da'an City, Jilin Province[J/OL]. *Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(1): 251–257. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180131. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.031. (in Chinese)
- [5] SUN G, LI W, ZHU C, et al. Spatial variability of soil carbon to nitrogen ratio and its driving factors in Ili River valley, Xinjiang, Northwest China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2017, 27(4): 529–538.
- [6] LI Q, LUO Y, WANG C, et al. Spatiotemporal variations and factors affecting soil nitrogen in the purple hilly area of Southwest China during the 1980s and the 2010s[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 547: 173–181.
- [7] HUANG D D, CHEN X W, CAO G J, et al. Effects of long-term conservation tillage on soil nitrogen content and organic nitrogen components in a Chinese mollisol[J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2018, 16(5): 5517–5528.
- [8] 赵思腾, 师尚礼, 陈建纲, 等. 陇中旱作区不同轮作方式对土壤碳、氮含量及酶活性的影响特征[J]. *草地学报*, 2019, 27(4): 817–824.
- ZHAO Siteng, SHI Shangli, CHEN Jian'gang, et al. Effects of different rotation patterns on soil carbon and nitrogen contents and enzyme activities in the arid region of Central Gansu[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, 27(4): 817–824. (in Chinese)
- [9] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116–134.
- WANG Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: principle and prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116–134. (in Chinese)
- [10] PENG W, KUANG T, TAO S. Quantifying influences of natural factors on vegetation NDVI changes based on geographical detector in Sichuan, Western China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 233(2): 353–367.
- [11] SHEN W, ZHENG Z C, QIN Y C, et al. Spatiotemporal characteristics and driving force of ecosystem health in an important ecological function region in China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(14): 5075.
- [12] RONG G, LI K, HAN L, et al. Hazard mapping of the rainfall-landslides disaster chain based on GeoDetector and Bayesian network models in Shuicheng County, China[J]. *Water*, 2020, 12(9): 2572.
- [13] JIANG Y, SUN Y, ZHANG L, et al. Influence factor analysis of soil heavy metal Cd based on the GeoDetector[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2020, 34(6): 921–930.
- [14] 苟照君, 李英年, 刘峰贵, 等. 黄河上游高寒草地土壤全氮含量分布特征及其影响因素[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(9): 2585–2594.
- GOU Zhaojun, LI Yingnian, LIU Fenggui, et al. Distribution and influencing factors of soil total nitrogen in alpine grassland of upper Yellow River[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(9): 2585–2594. (in Chinese)
- [15] 胡贵贵, 杨联安, 封涌涛, 等. 基于地理探测器的宝鸡市农田土壤养分影响因子分析[J]. *土壤通报*, 2020, 51(1): 71–78.
- HU Guigui, YANG Lianan, FENG Yongtao, et al. Influencing factors of soil nutrients in farmland of Baoji based on geographical detector[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, 51(1): 71–78. (in Chinese)
- [16] 张燕江, 王俊鹏, 王瑜, 等. 农牧交错带典型区土壤氮磷空间分布特征及其影响因素[J]. *环境科学*, 2021, 42(6): 3010–3017.
- ZHANG Yanjiang, WANG Junpeng, WANG Yu, et al. Spatial patterns of nitrogen and phosphorus in soil and their influencing factors in a typical agro-pastoral ecotone[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(6): 3010–3017. (in Chinese)
- [17] 林建平, 邓爱珍, 赵小敏, 等. 南方典型丘陵山区不同高程耕地土壤养分变化特征分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(5): 300–309.
- LIN Jianping, DENG Aizhen, ZHAO Xiaomin, et al. Variation characteristics of soil nutrients of cultivated land in different elevation fields in typical hilly areas of southern mountains [J/OL]. *Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(5): 300–309. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190534&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.034. (in Chinese)
- [18] MO F, HAN J, WEN X, et al. Quantifying regional effects of plastic mulch on soil nitrogen pools, cycles, and fluxes in rain-fed agroecosystems of the Loess Plateau[J]. *Land Degradation & Development*, 2020, 31(13): 1675–1687.
- [19] 卓志清, 李勇, 兴安, 等. 东北旱作区土壤碳氮磷生态化学计量特征及其影响因素[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(10): 259–268.
- ZHUO Zhiqing, LI Yong, XING An, et al. Characteristic of ecological stoichiometry of soil C, N and P and its influencing factors in dry farming region of Northeast China[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(10): 259–268. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191030&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.030. (in Chinese)
- [20] 赵业婷. 基于GIS的陕西省关中地区耕地土壤养分空间特征及其变化研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- ZHAO Yeting. Spatial characteristics and changes of soil nutrients in cultivated land of Guanzhong Region in Shaanxi Province based on GIS[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015. (in Chinese)
- [21] 陕西省土壤普查办公室. 陕西土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1992: 187–395.
- [22] MOORE I D, GESSLER P E, NIELSEN G A E, et al. Soil attribute prediction using terrain analysis [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57(6): 1548.
- [23] 陕西省气象局区划办公室. 陕西省农业气候区划[M]. 西安: 西安地图出版社, 1988: 4–140.
- [24] WANG S, WANG X, OUYANG Z. Effects of land use, climate, topography and soil properties on regional soil organic carbon and total nitrogen in the upstream watershed of Miyun Reservoir, North China[J]. *J. Environ. Sci. (China)*, 2012, 24(3): 387–395.

- [25] GAO X, XIAO Y, DENG L, et al. Spatial variability of soil total nitrogen, phosphorus and potassium in Renshou County of Sichuan Basin, China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18(2): 279–289.
- [26] 陕西省农业勘测设计院. 陕西农业土壤[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1982: 100–103.
- [27] 李佳佳, 樊妙春, 上官周平. 黄土高原南北样带刺槐林土壤碳、氮、磷生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2019, 39(21): 7996–8002.
LI Jiajia, FAN Miaochun, SHANGGUAN Zhouping. Ecological stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen, and phosphorus of the *Robinia pseudoacacia* forest on the north-south strip of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(21): 7996–8002. (in Chinese)
- [28] 严玉梅, 李水利, 李茹, 等. 陕西省耕地土壤养分现状与分布特征[J]. 土壤通报, 2019, 50(6): 1298–1305.
YAN Yumei, LI Shuili, LI Ru, et al. Current situation and distribution characteristics of soil nutrients in cultivated land of Shaanxi Province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(6): 1298–1305. (in Chinese)
- [29] LIU Z, SHAO M, WANG Y. Regional spatial patterns of soil total nitrogen and soil total phosphorus across the Loess Plateau region, China[J]. Water Resources Management, 2013, 197: 67–68.
- [30] HUYNH H T, HUFNAGEL J, WURBS A, et al. Influences of soil tillage, irrigation and crop rotation on maize biomass yield in a 9-year field study in Müncheberg, Germany[J]. Field Crops Research, 2019, 241(35): 107565.

(上接第 152 页)

- [28] ZHANG W, NIU W Q, LI G, et al. Lateral inner environment changes and effects on emitter clogging risk for different irrigation times[J]. Agricultural Water Management, 2020, 233: 106069.
- [29] 李云开, 王伟楠, 孙昊苏. 再生水滴灌毛管内颗粒-管壁碰撞特性研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 159–166.
LI Yunkai, WANG Weinan, SUN Haosu. Particle-wall collision characteristics influenced by biofilms in drip irrigation laterals with reclaimed water[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 159–166. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150923&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.023. (in Chinese)
- [30] 王亚林, 朱德兰, 张林, 等. 滴灌毛管泥沙分布与灌水器堵塞试验研究[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 177–182.
WANG Yalin, ZHU Delan, ZHANG Lin, et al. Experiment on sediment distribution in lateral pipes and clogging of emitter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 177–182. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140627&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.06.027. (in Chinese)
- [31] 金文, 张鸿雁. 灌水器内流道流场 Micro-PIV 试验分析[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 12–17.
JIN Wen, ZHANG Hongyan. Micro-PIV analysis of flow fields in flow channel of emitter[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(2): 12–17. (in Chinese)
- [32] 荆树励, 李梅, 冉宇, 等. 微纳米气泡对细粒稀土矿物聚团行为的影响[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(3): 113–117.
JING Shuli, LI Mei, RAN Yu, et al. The influence of micro-nano bubbles on the agglomeration behavior of fine-grained rare earth minerals[J]. Mining Research and Development, 2019, 39(3): 113–117. (in Chinese)
- [33] 郭超, 何青, 郭磊城, 等. 紊动对黏性细颗粒泥沙絮凝沉降影响的试验研究[J]. 泥沙研究, 2019, 44(2): 18–25.
GUO Chao, HE Qing, GUO Leicheng, et al. Study on the effects of turbulence on cohesive sediment flocculation and settling properties[J]. Journal of Sediment Research, 2019, 44(2): 18–25. (in Chinese)
- [34] 孙茹, 薛红俊. 微纳米气泡技术在环保领域中的应用[J]. 石化技术, 2021, 28(4): 61–62.
SUN Ru, XUE Hongjun. Analysis on the application of micro-nano bubble technology in environmental protection field[J]. Petrochemical Technology, 2021, 28(4): 61–62. (in Chinese)
- [35] 龚政, 葛冉, 冯骞, 等. 泥沙颗粒间黏结力作用及其对泥沙起动影响研究进展[J/OL]. 水科学进展, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20210517.1529.002.html>.
- [36] 陈文胜, 付君浩, 韩海生, 等. 微细粒矿物分选技术研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(4): 134–145.
CHEN Wensheng, FU Junhao, HAN Haisheng, et al. Advance in the separation of ultrafine minerals[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020, 40(4): 134–145. (in Chinese)
- [37] CALGAROTO S, WILBERG K Q, RUBIO J. On the nanobubbles interfacial properties and future applications in flotation[J]. Minerals Engineering, 2014, 60(6): 33–40.
- [38] 李婷竹, 郭冀峰, 王嘉琳, 等. 微纳米气泡及其在环境工程领域的应用[J]. 净水技术, 2021, 40(2): 88–92, 110.
LI Tingzhu, GUO Jifeng, WANG Jialin, et al. Micro and nano bubbles and the applications in environmental engineering[J]. Water Purification Technology, 2021, 40(2): 88–92, 110. (in Chinese)
- [39] 张宇卓, 张根广. 黏性泥沙絮团形态的模拟研究[J]. 泥沙研究, 2021, 46(3): 16–19, 42.
ZHANG Yuzhuo, ZHANG Genguang. Simulation study on flocculation morphology of cohesive sediment[J]. Journal of Sediment Research, 2021, 46(3): 16–19, 42. (in Chinese)
- [40] LUO Y X, LI H, DING W Q, et al. Effects of dlvo, hydration and osmotic forces among soil particles on water infiltration[J]. European Journal of Soil Science, 2018, 69(4): 710–718.
- [41] BIZIMANA H, AITUNKAYNAK A. Prediction of the incipient motion of sediment entrainment via a novel hybrid geno-fuzzy approach with experimental investigations[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2021, 147(5): 04021013.