

崩岗洪积扇养分输移规律研究*

张 勇¹ 丁树文^{1,2} 魏玉杰¹ 王秋霞¹

(1. 华中农业大学水土保持研究中心, 武汉 430070; 2. 农业部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 利用 RTK GPS 定位技术对崩岗洪积扇的基本理化性质及洪积扇不同位点的养分分布情况进行研究。实验位于湖北通城县一处典型的崩岗洪积扇, 研究发现碱解氮、速效钾质量比均随距离扇口距离的增加而有规律的增大, 速效磷质量比随距离扇口距离的增加则表现出有增大的趋势, 但局部规律性不明显。养分含量与主要影响因素的研究发现各主要养分含量均随取样高程、有机质质量比呈近线性分布, 随粘粒质量分数的平方变化呈近线性变化, 各主要养分在洪流作用下水平移动均很明显, 但在洪流之后, 碱解氮容易扩散而再分布, 速效钾的再分布现象却不明显。

关键词: 崩岗 洪积扇 泥沙 养分输移

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)10-0216-07

Transfer Rules of Soil Nutrients in Collapsing Pluvial Fan

Zhang Yong¹ Ding Shuwen^{1,2} Wei Yujie¹ Wang Qiuxia¹

(1. Research Center of Water and Soil Conservation, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Key Laboratory of Arable Land Conservation for Middle and Lower Reaches of Yangtze River,
Ministry of Agriculture, Wuhan 430070, China)

Abstract: Based on the RTK GPS positioning technology, the basic physical and chemical properties and nutrient distribution of the collapsing pluvial fan were studied. Experiments with a typical collapsing pluvial fan had been made in Tongcheng County, Hubei Province. It was found that the content of alkali hydrolyzable nitrogen and available potassium were risen regularly with the increase of distance from the fan starting point and available phosphorus was increased enormously, but no prominent partial regularity increase was discovered. The study of the relationship between the nutrient contents and the main factors revealed that the main nutrient contents showed a linear distribution with the sampling elevation and the organic matter contents and a linear change with the square of clay content. The studied nutrients all shared a distinctive movement in the horizontal direction with the flood and the diffusion, and redistribution of alkali hydrolyzable nitrogen following the flood was more obvious than that of available potassium.

Key words: Collapsing Pluvial fan Sediment Nutrient transfer

引言

崩岗洪积扇是由泥沙推移而形成的一种坡度较缓的扇状堆积体, 其大量泥沙的输移直接引起农田产量降低甚至农田损毁, 中国南方大量良田受到崩

岗洪积扇泥沙输出的直接威胁。为实现耕地资源可持续发展, 开发和研究洪积扇等潜在良性耕地成为热点^[1]。崩岗洪积扇来水充足、地势平坦、数量众多, 具有很大的生产潜力。洪积扇体由沉积的水携沉积物或厚的泥沙沉积物组成, 主体是长宽比的 5 ~

收稿日期: 2014-10-31 修回日期: 2014-11-20

* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD31B04) 和国家自然科学基金资助项目(41201271)

作者简介: 张勇, 博士生, 主要从事花岗岩风化土可蚀性及崩岗稳定性研究, E-mail: yongzchn@163.com

通讯作者: 丁树文, 副教授, 主要从事水土保持、农业生态环境保护研究, E-mail: dingshuwen@mail.hzau.edu.cn

20 倍的蔗状体。洪积扇的泥沙分布和地形地貌具有很强的规律性。Bull 和 Harvey 先后根据大量的洪(冲)积扇模型,提出洪(冲)积扇的坡度与流域面积的负幂成正比,并建立了相应的模型^[2-3],Melton 在此模型基础上提出修正,他提出洪(冲)积扇坡度与流域地势高差和流域面积的比值的负幂成正比^[4],莫多闻等根据冲积扇面积也提出冲积扇坡度与流域面积的负幂和流域地势起伏度的幂的乘积成正比,冲积扇的面积与流域面积的幂和流域地势起伏度的幂成正比^[5]。洪(冲)积扇的形成规律部分遵循河床推移质的运移规律,Gomez 等用无量纲化的推移质运移率和泥沙侵蚀堆积平衡方程来解释洪积扇泥沙的来源,探究了洪积扇发育与演化过程^[6]。Coulthard 等通过结合径流汇流模型、河流沉积方程和泥沙侵蚀堆积平衡方程,分析了冲(洪)积扇在降雨情况下的泥沙分布规律,认为降雨和径流条件对泥沙分布有直接影响^[7]。

泥沙输移是养分流失的主要方式,洪积扇泥沙迁移和地形条件的规律性使养分的运输具有典型性。氮素的衰减和水动力条件紧密相关^[8-9],磷素的输出、输移过程与颗粒粒径相关^[10],研究发现,养分流失总量随地面坡度增大呈幂函数增加,土壤养分衰减氮素较磷素快,肥力高的土壤相对衰减快,坡度大相对衰减慢^[11]。目前对营养元素输移的研究方法主要有试验法^[12]、监测法^[13]、示踪法^[14]、土壤侵蚀相关法^[15]以及模拟法^[16],试验法的研究尺度较小;监测法通常精度较低;同位素示踪方法相对定位较为准确,但在野外局域面内操作具有很大的局限性,且很难完全统计固有养分含量;土壤侵蚀相关算法的地形限制条件较多;模拟法简单容易操作但需考虑的相关因素较多,而通过结合试验法、模拟法和高精度定位技术可以综合各方法的优缺点,使研究更接近养分输移的物理过程。GIS 技术进行的点定位技术在范围内的水文研究上应用广泛^[17-18],利用 GIS 技术进行定位取样再进行养分测定,既能统计测点上所有养分含量,又具有很高的精度。目前对养分在小区域内横向输移的特征仍有待探究,这主要是因为养分的分布在空间位移上缺乏系统研究,且很难确定流域尺度上的测点定位。本文通过结合洪积扇泥沙分布规律及养分输移规律,利用 RTK GPS 定位技术对测点进行确定,在不同洪积扇位置进行土壤采集,测量养分含量,根据取样点位置和养分含量,研究养分在洪积扇空间上的分布情况,寻找土壤养分在洪积扇中的输移规律,探讨洪积扇土壤质量的退化过程与特征,对于控制土壤退化、加速退化生态系统的恢复与重建具有重要的理论价值

与指导意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与采样

研究区位于湖北省咸宁市通城县,在湖北省东南部,湘、赣、鄂三省交界处,县域内崩岗数量达 1 100 多处,占湖北省崩岗总数的 47%,是崩岗集中分布的典型区域。全县年平均气温 16.7℃,年平均降水量 1 512.8 mm,多年平均径流深 795 mm。

洪积扇坐标为 19°11'45"E,113°27'47"N,海拔高度在 97.52~97.99 m 之间,洪积扇面积 76.62 m²,崩岗位于洪积扇的扇口上游,相对地形位置见图 1,崩岗侵蚀的泥沙随洪流搬运堆积在山脚,威胁山脚的民居和农田。实验洪积扇的土壤采样时间为 2012 年 10 月,在研究区域内采用 2 m×2 m 网格法选取土壤表层样点,取样深度为 5 cm,将每个位置采集的土样分别装入样品袋中,并在样品袋外贴上标签,注明序号。利用 GPS-RTK(S86 型,南方测绘有限公司)准确定位研究区域的边界,以及采样点的经纬度。



图 1 洪积扇所处位置

Fig.1 Location of study pluvial fan

实验 RTK 采用 GSM 网络传输,保证数据的传输效率、范围及定位的精准性。因实验区域高低起伏度和面积均较小,实验要求精度较高,因此选用精度较高的实时动态 GPS-RTK 技术,实验测点时保持 4 颗以上卫星相位观测值的跟踪,读数稳定后读数,储存固定解,记录单点解、差分解,保证测点的准确性。研究区崩岗洪积扇共采样 21 个测点,每个测点进行 5 次重复实验,定义山脚下泥沙厚度初出现 5 cm 处为扇口位置,根据与扇口位置的距离 0~5 m 分为扇顶、距离 5~10 m 为扇中、距离大于 10 m 为扇缘。崩岗洪积扇点位分布如图 2 所示,其中测点

8、20、21 距离分界太近,因此作为模型的检测点。

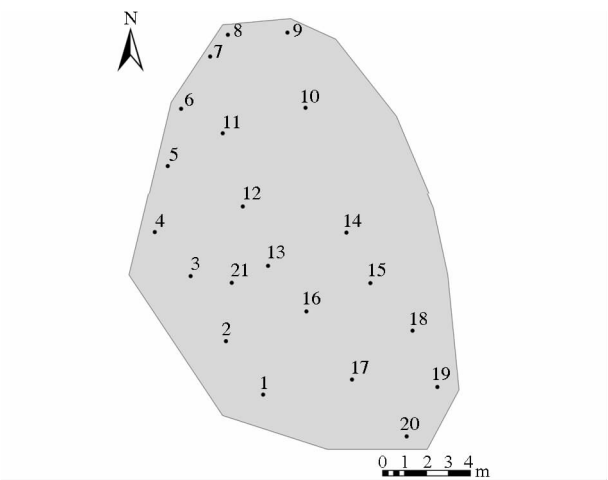


图2 洪积扇取样点分布位置
Fig.2 Sampling points in pluvial fan

1.2 基本性质测定

实验共分析 9 个土壤性质指标,即土壤养分、土壤质地、土壤 pH 值,其中土壤养分指标为 5 个,包括碱解氮、速效磷、速效钾、有机质质量比、阳离子交换量(CEC);土壤质地指标 3 个,分别为砂粒、粉粒、粘粒质量分数。

取样点高程和位置使用 RTK 测定;土壤碱解氮采用碱解扩散法;土壤速效磷采用氟化铵-盐酸浸提-氯化亚锡甘油比色法;土壤速效钾采用醋酸铵浸提,火焰光度法;土壤有机质采用重铬酸钾外加热氧化法;阳离子交换量采用 EDTA-乙酸铵盐交换法;土壤质地采用国际制吸管法(结果以质量分数表示);土壤 pH 值采用 2.5:1 水土质量比 pH 计电位法。

表 1 不同区域土壤性质
Tab.1 Soil properties in different areas

点位	有机质质量比/ (g·kg ⁻¹)	pH 值	CEC/ (cmol·kg ⁻¹)	粘粒 质量分数/%	碱解氮质量比/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷质量比/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾质量比/ (mg·kg ⁻¹)
1	1.27 ± 0.11	6.11 ± 0.12	3.64 ± 0.12	4.95 ± 0.71	8.62 ± 1.53	1.89 ± 0.28	4.18 ± 0.92
2	1.41 ± 0.31	5.31 ± 0.05	2.75 ± 0.26	3.69 ± 0.71	8.97 ± 0.46	1.71 ± 0.90	6.17 ± 1.23
3	1.25 ± 0.09	5.15 ± 0.09	2.25 ± 0.08	2.63 ± 1.12	7.76 ± 0.73	2.84 ± 0.24	7.13 ± 2.19
4	1.40 ± 0.19	5.15 ± 0.07	2.88 ± 0.21	4.60 ± 0.91	11.06 ± 2.89	1.95 ± 0.19	6.69 ± 0.76
5	0.78 ± 0.21	5.29 ± 0.03	4.55 ± 0.19	7.03 ± 1.27	11.50 ± 0.37	1.81 ± 0.27	8.66 ± 2.34
6	1.60 ± 0.31	5.81 ± 0.07	5.15 ± 0.32	11.95 ± 2.31	13.79 ± 0.93	2.98 ± 0.10	9.30 ± 3.76
7	2.64 ± 0.47	5.93 ± 0.04	5.82 ± 0.28	6.51 ± 1.83	14.66 ± 1.19	3.01 ± 0.36	30.88 ± 4.39
8	3.10 ± 0.16	5.40 ± 0.09	6.72 ± 0.41	14.43 ± 3.71	13.97 ± 1.64	3.96 ± 0.41	32.59 ± 7.62
9	9.07 ± 0.56	5.16 ± 0.07	19.07 ± 0.79	28.86 ± 5.13	31.60 ± 0.60	4.08 ± 1.82	46.55 ± 6.21
10	6.15 ± 0.22	5.11 ± 0.11	15.01 ± 1.12	24.59 ± 9.12	22.49 ± 1.28	4.07 ± 0.39	41.78 ± 7.12
11	2.41 ± 0.16	5.37 ± 0.12	5.45 ± 0.62	8.31 ± 2.71	13.99 ± 1.37	3.85 ± 0.77	20.56 ± 3.55
12	2.64 ± 0.19	5.00 ± 0.03	2.87 ± 0.17	6.34 ± 3.76	10.38 ± 1.32	4.31 ± 1.02	15.17 ± 3.18
13	1.98 ± 0.08	4.98 ± 0.01	3.08 ± 0.37	8.66 ± 3.19	15.99 ± 0.41	2.96 ± 0.54	19.71 ± 2.01
14	3.59 ± 0.09	4.96 ± 0.02	8.47 ± 0.78	5.80 ± 1.21	16.98 ± 4.29	3.12 ± 0.42	17.05 ± 0.54
15	6.63 ± 0.42	4.75 ± 0.06	19.80 ± 0.81	28.05 ± 7.31	23.73 ± 2.27	4.74 ± 1.12	66.04 ± 7.39
16	3.59 ± 0.21	4.97 ± 0.04	3.43 ± 0.21	19.79 ± 6.92	24.98 ± 3.12	3.12 ± 1.21	23.05 ± 2.13
17	6.32 ± 0.27	5.25 ± 0.08	13.06 ± 0.51	13.98 ± 2.76	20.62 ± 1.82	2.91 ± 0.73	31.11 ± 4.62
18	7.51 ± 0.61	4.86 ± 0.07	21.11 ± 0.64	30.95 ± 4.97	26.31 ± 2.38	4.52 ± 0.89	63.57 ± 6.76
19	10.79 ± 0.18	4.99 ± 0.06	20.68 ± 0.69	32.20 ± 6.79	36.49 ± 1.25	4.01 ± 0.78	46.87 ± 7.23
20	11.34 ± 1.12	5.25 ± 0.10	22.92 ± 0.77	34.11 ± 4.66	50.84 ± 3.18	3.74 ± 0.29	47.30 ± 6.17
21	8.67 ± 0.72	4.73 ± 0.09	16.87 ± 0.29	15.02 ± 5.67	36.45 ± 2.39	3.30 ± 0.86	31.70 ± 4.92

1.3 处理模型

通过采集洪积扇内的测点进行数据归类和相关性分析,模型的回归误差算法为:对线性回归模型和一般曲线回归模型使用最小二乘法估计参数,对对数线性回归模型使用极大似然估计法估计参数,用碱解氮、速效磷、速效钾质量比 3 个养分数据作为因变量,用测点的空间位置和相关性高的因素做变量,进行单因素曲线回归和多元曲线回归,选取决定系数和自由度较大的曲线,通过偏回归分析去掉不必要的变量,最终获得养分分布的经验曲线模型。

1.4 数据处理

实验点位和图像使用 ArcGIS 9.3 处理,相关性使用 SPSS 18.0 进行分析,模型建立算法控制使用 Matlab 7.0,并用 Matlab 7.0、SPSS 18.0 进行拟合。

2 结果与分析

2.1 基本性质间的相关性

崩岗洪积扇主要由洪流搬运泥沙堆积在坡底形成,洪流沿沟道搬运具有一定的规律,结合取样点位位置高程和测定数据,进行相关性分析,所得结果见表 2。

表 2 土壤性质的相关系数矩阵
Tab. 2 Soil parameters correlation coefficient

相关系数	高程	有机质	pH 值	CEC	砂粒质量 分数	粉粒质量 分数	粘粒质量 分数	碱解氮质 量比	速效磷 质量比	速效钾 质量比
高程		-0.837 **	0.280	-0.652 **	0.594 **	-0.532 *	-0.816 **	-0.830 **	-0.758 **	-0.819 **
有机质			-0.257	0.858 **	0.796 **	0.752 **	0.855 **	0.926 **	0.766 **	0.898 **
pH 值				-0.092	0.075	-0.053	-0.255	-0.272	-0.372	-0.338
CEC					-0.958 **	0.934 **	0.848 **	0.859 **	0.649 **	0.862 **
砂粒质量分数						-0.979 **	-0.817 **	-0.759 **	-0.592 **	0.771 **
粉粒质量分数							0.745 **	0.742 **	0.527 **	0.742 **
粘粒质量分数								0.897 **	0.734 **	0.891 **
碱解氮质量比									0.655 **	0.869 **
速效磷质量比										0.823 **

注:数据采用 Pearson 双侧检验,**、* 分别表示在 $p < 0.01$ 和 $p < 0.05$ 水平下达到极显著和显著水平。

由表 2 可见,各指标之间的相关性均比较大。pH 值与养分指标之间的相关性并不显著,这说明,在洪积扇小范围内,pH 值没有明显的变化规律,pH 值不是影响养分分布不均的原因;高程与除 pH 值外所有指标间相关性基本上都表现为极其显著,洪积扇土壤性质都与所在点高程位置呈显著的规律性变化;土壤有机质是土壤中各种营养元素特别是氮、磷的重要来源,它具有胶体特性,能吸附较多阳离子,使土壤具有保肥力和缓冲性,且改善土壤结构,这使土壤有机质与其他指标相关性很高。碱解氮、速效磷、速效钾质量比 3 个主要养分数据的分布情况与土壤质地相关性较高,这可能是质地和有机质质量比都随洪流呈微地带性规律分布的原因。质地是土壤养分的一个重要涵养因素,尤其是粘粒的含量与土壤持水量直接相关,粘粒可能充当主要养分在固相下的主要附着体^[19-20],因此主要养分数据与质地中的粘粒质量分数相关性最高。

2.2 养分随扇形位置的变化规律

剔除 RTK 测量数据的异常值,保留固定解,剔除单点解和差分解,剔除平面精度大于 1 的浮点解,将采集的土壤样本的粘粒质量分数和主要养分数据及对应的位置数据导入 ArcGIS 9.3,进行克里金插值,生成 DEM 图,见图 3。

由图 3a 可见,崩岗洪积扇粘粒质量分数从扇顶到扇缘逐层递增;粘粒质量分数低于 5.08% 的范围集中分布在崩岗洪积扇的扇顶;粘粒质量分数介于 5.08% ~ 22.45% 的范围分布在扇中;其质量分数高于 22.45% 的范围集中分布在扇缘。这主要是因为随着水流搬运能力向边缘减弱,分选作用明显,主要表现为扇顶质地较粗,主要为砂、砾,扇缘为粉沙及亚粘土。泥沙的输移可以用 Gomez - Church 推移质运移规律模型进行解释^[6],洪积扇推移质运移是一个不断破坏泥沙粒子侵蚀与堆积的平衡过程,在水力梯度和沉积物负荷容量一定的情况下,密度和粒子尺寸都

较小的泥沙运移率更大,使得小颗粒密度小的泥沙更容易输移到更远的地方,在洪积扇上表现为扇顶泥沙粒子较大,扇缘泥沙粒子较小,泥沙分选性较强。

用图 3b、3c、3d 对比图 3a 可以发现,洪积扇的养分分布情况与粘粒分布存在明显的差异性。崩岗洪积扇主要养分的分布存在一定的规律性,其中碱解氮和速效钾质量比沿洪积扇推移方向呈辐射状升高,而速效磷的养分分布表现为总体具规律性,局部规律性不强。这主要是因为养分不仅随泥沙运移,也随水分移动。在强水流输出的洪流环境下,养分主要随泥沙进行运移,而在无法搬运泥沙的弱水流输出环境下,养分主要通过水流输移,造成养分的输移与泥沙的输移既存在相同的输移方向,又存在局部的差异性现象。

对土壤养分的常规统计分析能够概括土壤养分的全貌和整体特征,但不能够反映其局部的变化特征,即只在一定程度上反映样本全体,而不能定量地刻画土壤养分的随机性和结构性、独立性和相关性^[21]。通过对洪积扇养分的局部规律进行估计可以对洪积扇的养分分布区域特征进行定量的研究。

利用与扇口的距离(运距)来构造养分输移模型能够很好地反映在洪流直接作用下养分的分布情况,通过综合全部的 90 组数据(含 15 组无分区修正数据),用碱解氮、速效磷、速效钾的质量比分别对测点与扇口的距离、有机质、CEC、粘粒质量分数进行模型筛选和建立,发现各主要养分质量分布均与所在点与扇口距离、有机质质量比呈近线性分布,随粘粒质量分数的平方变化也呈近线性变化。检验模型为

$$N_c = aL + bO_m + cC_l^2 + d \tag{1}$$

式中 N_c ——所在点养分质量比,mg/kg
 L ——所在点与扇口距离,m
 O_m ——所在点有机质质量比,g/kg
 C_l ——所在点粘粒质量分数,%
 $a、b、c、d$ ——影响参数

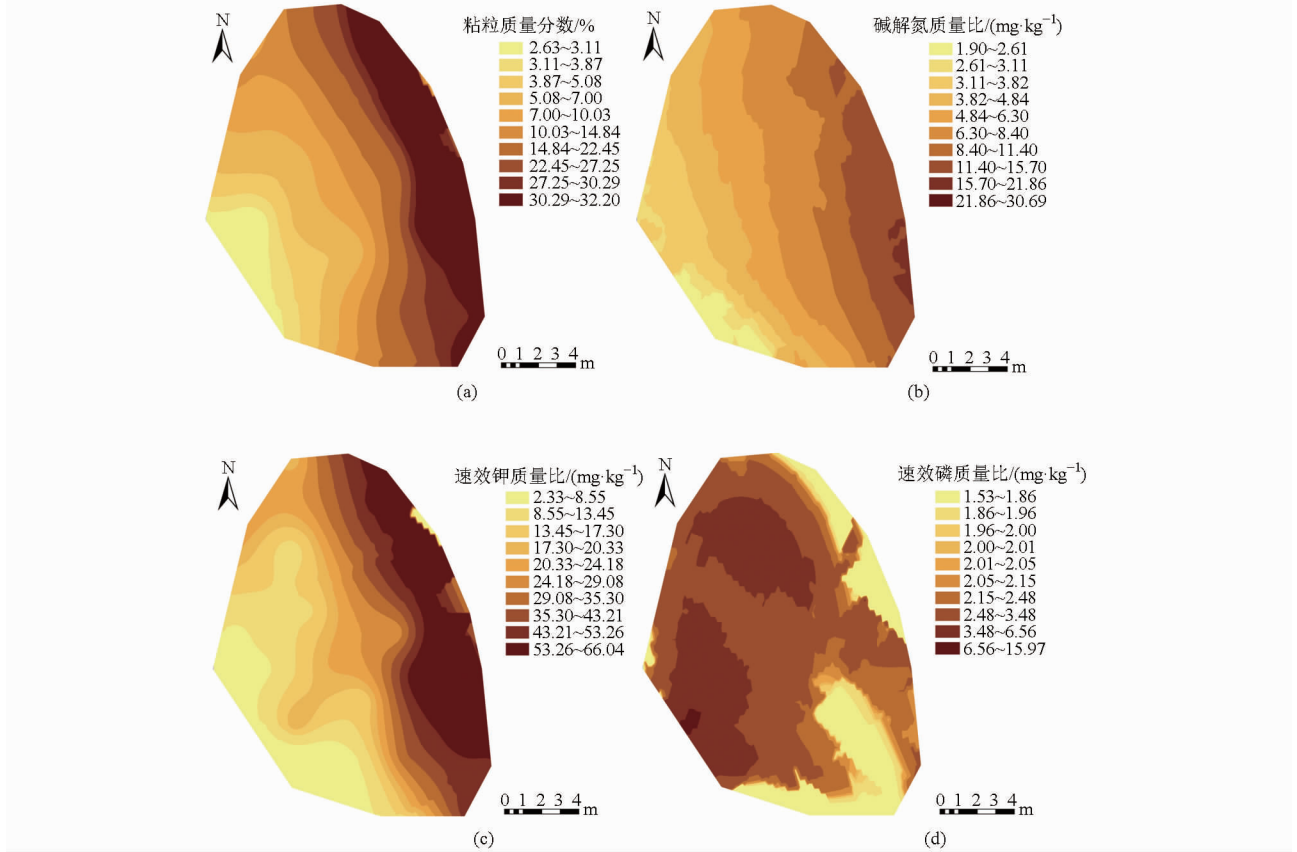


图3 粘粒与主要养分分布
Fig. 3 Distribution of clay content and main nutrients

对洪积扇及扇顶、扇中、扇缘区域分别使用模型(1)进行拟合,得到的参数如表3所示。

表3 土壤养分分布函数拟合参数(运距模型)
Tab.3 Fitted parameters of distribution of soil nutrient model(transport distance)

养分指标	位置	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>R</i> ²
碱解氮 质量比	洪积扇	0.926	0.804	0.005	3.180	0.932
	扇顶	0.412	-1.322	0.032	8.152	0.803
	扇中	0.779	0.441	0.020	4.261	0.635
	扇缘	4.919	0.585	-0.021	-37.478	0.955
速效磷 质量比	洪积扇	0.293	-0.227	0.001	0.730	0.796
	扇顶	-0.182	0.573	0.011	1.927	0.964
	扇中	-0.255	0.093	0.001	5.801	0.674
	扇缘	-0.388	-0.037	0.004	7.848	0.895
速效钾 质量比	洪积扇	2.662	-1.214	0.030	-6.737	0.851
	扇顶	-1.357	-1.697	0.057	14.800	0.817
	扇中	8.854	-5.239	0.044	-57.885	0.974
	扇缘	-13.750	-0.747	0.139	161.792	0.934

由表3可知,所有拟合的决定系数 *R*² 均达到0.635以上,根据模型拟合结果,与扇口的距离每增加1 m,碱解氮增加0.925 mg/kg,速效磷增加0.293 mg/kg,速效钾增加2.662 mg/kg。洪积扇整体分布的水平距离决定系数均为正数,说明随距离扇口位置的增加,各养分质量比呈上升的趋势,速效钾的水平距离决定系数最大,说明速效钾受水力作

用影响的效果最明显。磷的水平距离决定系数最小,表明磷的运移受水力作用影响较微弱。在洪积扇不同区域内,水平距离影响参数的变化呈无规律性,在洪积扇小区域内,水力作用的影响十分小,养分的分布受地表湿润后水分的扩散影响较大,而在扇形整体范围内,具有辐射降低的趋势的规律性十分明显。因出口呈先窄后宽的平面地貌,水力对泥沙的推进呈发散状,水力因素对有机质及质地等的影响规律性很差、突发性很强。因此养分等易扩散的因素总体分布规律较强,局部规律性较差。

2.3 养分随高程变化的规律

洪积扇土壤养分随洪流进行规律性运移之后会在局部进行再分布,这种分布在区域内很大程度上受微地形的影响。为进一步研究养分在洪积扇局域分布的不规律性,并区分养分在水平方向的移动来研究再分布情况,导入高程数据进一步分析,利用函数模型进行模拟养分随高程等因素的分布情况,其函数式为

$$N_c = aH + bO_m + cC_l^2 + d \tag{2}$$

式中 *H*——所在点高程,m

分别对洪积扇及扇顶、扇中、扇缘区域使用模型(2)进行拟合,得到参数如表4所示。

表 4 土壤养分分布函数拟合参数(高程模型)

Tab.4 Fitted parameters of distribution of soil nutrient model(elevation)

养分指标	位置	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>R</i> ²
碱解氮质量比	洪积扇	-16.329	1.451	0.005	1 607.031	0.928
	扇顶	-5.292	-0.753	0.041	527.702	0.788
	扇中	58.050	0.644	0.038	-5 665.315	0.810
	扇缘	-81.830	0.741	0.021	7 993.747	0.938
速效磷质量比	洪积扇	-3.517	0.022	0.001	346.732	0.567
	扇顶	1.462	0.657	0.010	-142.263	0.903
	扇中	-3.064	-0.714	0.002	304.402	0.560
	扇缘	1.866	-0.255	0.003	-178.275	0.855
速效钾质量比	洪积扇	-51.216	-1.728	0.053	5 025.356	0.815
	扇顶	12.529	-1.306	0.044	-1 219.404	0.797
	扇中	-64.779	3.657	-0.028	6 352.358	0.789
	扇缘	54.727	-8.115	0.107	-5 319.471	0.917

根据表 4,从不同养分指标来看,所有养分分布的拟合决定系数均达到 0.560 以上,根据拟合结果,高程每下降 0.1 m,碱解氮质量比降低 1.633 mg/kg,速效磷质量比降低 0.352 mg/kg,速效钾降低 5.122 mg/kg。高程模型拟合的决定系数在洪积扇内整体较大,这可能是因为重力和毛管力控制着溶质的运移,使养分向下运输的原因^[22],碱解氮和速效钾的拟合决定系数达到 0.815 以上,而速效磷的整体决定系数仅为 0.567,这可能是磷素在水作用下输移作用较差,因而线性规律性较差的原因;从养分的不同影响条件来看,高程影响在洪积扇整体区域参数均为负数,这说明随高程降低,所有养分指标的含量均呈降低趋势,且速效钾的影响参数最大,这主要是因为钾素在土壤中活泼性较高,表现出较好的运移性^[23],这使得钾素更容易流失,而速效磷的高程影响参数最小,这是因为磷素在土壤中的移动性差,难迁移,土壤速效磷的变异系数很高的原因^[24]。速效钾的有机质影响参数为负,这可能是钾在土壤中主要以无机形态存在,碱解氮的有机质影响参数最大,这是因为有机质里还有相对较多的易水解氮的原因。主要养分元素的粘粒质量分数影响参数均为正,且速效钾的最大,速效磷的最小,这可能是因为钾素容易形成半径较小的离子,而使粘粒更容易储运钾素的原因。从洪积扇不同区域来看,区域内规律性较差,这是养分的运移水力作用影响较大,而扩散作用较小的结果。

结合洪积扇养分输移运距模型和高程模型可以发现,在养分总体分布情况拟合上,运距模型决定系数稍优于高程模型,这说明主要养分按与扇口位置

的距离规律分布能够更好地解释养分总体的输移情况,洪流水力是养分输移的主要动力来源。从养分在洪积扇不同区域的输移情况来看,碱解氮高程模型在洪积扇扇中区域的决定系数明显优于运距模型,这说明在洪积扇的部分区域内,碱解氮按所处位置高低规律分布能更好地解释其变异情况,这也说明氮素在洪流之后,容易扩散而再分布;速效钾各区域的运距模型稍优于高程模型,这说明速效钾再分布的现象并不明显。

3 结论

(1)崩岗洪积扇中碱解氮、速效磷、速效钾的分布与土壤中的有机质、质地以及所处点的位置相关性极其显著,而与所在点的 pH 值无明显相关,洪积扇中养分的输移主要通过溶解成电解质流动或在固相下以土壤颗粒为载体移动,其中粘粒可能是养分运移的主要载体。

(2)洪流扇顶的汇集对泥沙的分选作用很明显,细小而密度较小的颗粒更容易随洪流运移,在洪积扇内部,养分会随水分扩散和下渗,局部规律性出现降低;洪流对速效磷的运移比较有限,磷素在洪积扇内表现为难迁移,变异性较大,碱解氮和速效钾则表现出极强的可运移性,在洪积扇内呈规律性很强的分布;崩岗洪积扇的养分含量由洪流进行一次分布,然后在洪流之后,由重力和毛管作用力进行再分布;对比运距模型和高程模型,可以发现洪流水力是洪积扇养分输移的主要动力来源;在洪积扇内部区域,碱解氮容易扩散而再分布,而速效钾的再分布现象却不明显。

参 考 文 献

1 赵其国, 周生路, 吴绍华, 等. 中国耕地资源变化及其可持续利用与保护对策[J]. 土壤学报, 2006, 43(4): 662 - 672.
Zhao Qiguo, Zhou Shenglu, Wu Shaohua, et al. Cultivated land resources and strategies for its sustainable utilization and protection in China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(4): 662 - 672. (in Chinese)

- 2 Bull W B. Relations of alluvial fan size and slope to drainage basin size and lithology in western Fresno County, CA[M] // US Geological Survey Library. US Geological Survey Professional Paper, 1962; 51 – 53.
- 3 Harvey A M. The occurrence and role of aridzone alluvial fans[M] // Thomas D S G. Arid Zone Geomorphology, London: Belhaven Press, 1989; 136 – 158.
- 4 Melton M A. The geomorphic and paleoclimatic significance of alluvial deposits in southern Arizona[J]. The Journal of Geology, 1965, 73(1): 1 – 38.
- 5 莫多闻, 朱忠礼, 万林义. 贺兰山东麓冲积扇发育特征[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 1999, 35(6): 816 – 823.
Mo Duowen, Zhu Zhongli, Wan Linyi. The alluvial fans along the eastern foot of Helan Mountain[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 1999, 35(6): 816 – 823. (in Chinese)
- 6 Gomez B, Church M. An assessment of bed load sediment transport formulae for gravel bed rivers[J]. Water Resources Research, 1989, 25(6): 1161 – 1186.
- 7 Coulthard T J, Macklin M G, Kirkby M J. Acellular model of Holocene upland river basin and alluvial fan evolution[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2002, 27(3): 269 – 288.
- 8 王沛芳, 王超, 胡颖. 氮在不同生态特征沟渠系统中的衰减规律研究[J]. 水利学报, 2007, 38(9): 1135 – 1139.
Wang Peifang, Wang Chao, Hu Ying. Nitrogen degradation efficiency in channels with different ecological characteristics[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(9): 1135 – 1139. (in Chinese)
- 9 梁涛, 张秀梅, 章申, 等. 西苕溪流域不同土地类型下氮元素输移过程[J]. 地理学报, 2002, 57(4): 389 – 396.
Liang Tao, Zhang Xiumei, Zhang Shen, et al. Nitrogen elements transferring processes and fluxes under different land use in west Tiaoxi catchment[J]. Acta Geographica Sinica, 2002, 57(4): 389 – 396. (in Chinese)
- 10 孔燕, 和树庄, 胡斌, 等. 滇池流域富磷地区暴雨径流中磷素的沉降及输移规律[J]. 环境科学学报, 2012, 32(9): 2160 – 2166.
Kong Yan, He Shuzhuang, Hu Bin, et al. The settlement and transfer rule of phosphorus in stormwater runoff from phosphorus-rich area in Dianchi Watershed[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(9): 2160 – 2166. (in Chinese)
- 11 刘秉正, 李光录, 吴发启, 等. 黄土高原南部土壤养分流失规律[J]. 水土保持学报, 1995, 9(2): 77 – 86.
Liu Bingzheng, Li Guanglu, Wu Faqi, et al. The regular patterns of the loss of soil nutrients on Southern Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1995, 9(2): 77 – 86. (in Chinese)
- 12 王建中, 刘凌, 宋兰兰. 坡地氮磷流失过程模拟[J]. 水科学进展, 2009, 20(4): 531 – 536.
Wang Jianzhong, Liu ling, Song Lanlan. Simulation of nitrogen and phosphorus loss in sloping field[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(4): 531 – 536. (in Chinese)
- 13 Garcia-Esteves J, Ludwig W, Kerhervé P, et al. Predicting the impact of land use on the major element and nutrient fluxes in coastal Mediterranean rivers: the case of the Têt River (Southern France)[J]. Applied Geochemistry, 2007, 22(1): 230 – 248.
- 14 Wang S, Tang C, Song X, et al. Using major ions and $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$ to identify nitrate sources and fate in an alluvial aquifer of the Baiyangdian lake watershed, North China Plain[J]. Environmental Science: Processes & Impacts, 2013, 15(7): 1430 – 1443.
- 15 黄金良, 洪华生, 张路平, 等. 基于 GIS 的九龙江流域农业非点源氮磷负荷估算研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(5): 866 – 871.
Huang Jinliang, Hong Huasheng, Zhang Luoping, et al. Nitrogen and phosphorus loading of agricultural non-point sources in Jiulong River Watershed based on GIS[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2004, 23(5): 866 – 871. (in Chinese)
- 16 刘凌, 贺国庆. 西江流域硝酸盐氮输出规律研究[J]. 水科学进展, 2005, 16(5): 655 – 660.
Liu Ling, He Guoqing. Study on nitrate-N export changes of the Xijiang River[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(5): 655 – 660. (in Chinese)
- 17 De Smedt F, Liu Y B, Gebremeskel S. Hydrologic modeling on a catchment scale using GIS and remote sensed land use information[C] // International Conference of Risk Analysis, 2000: 295 – 304.
- 18 Satti S R, Jacobs J M. A GIS-based model to estimate the regionally distributed drought water demand[J]. Agricultural Water Management, 2004, 66(1): 1 – 13
- 19 Petrovic A M. Impact of soil texture on nutrient fate[C] // The First International Conference on Turfgrass Management and Science for Sports Fields, 2003: 93 – 98.
- 20 Silver W L, Neff J, McGroddy M, et al. Effects of soil texture on belowground carbon and nutrient storage in a lowland Amazonian forest ecosystem[J]. Ecosystems, 2000, 3(2): 193 – 209.
- 21 张淑娟, 何勇, 方慧. 基于 GPS 和 GIS 的田间土壤特性空间变异性的研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(2): 39 – 44.
Zhang Shujuan, He Yong, Fang Hui. Spatial variation of soil properties in the field based on GPS and GIS[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(2): 39 – 44. (in Chinese)
- 22 Cote C M, Bristow K L, Charlesworth P B, et al. Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation[J]. Irrigation Science, 2003, 22(3 – 4): 143 – 156.
- 23 尹飞虎, 刘洪亮, 谢宗铭, 等. 棉花滴灌专用肥氮磷钾元素在土壤中的运移及其利用率[J]. 地理研究, 2010, 29(2): 235 – 243.
Yin Feihu, Liu Hongliang, Xie Zongming, et al. Movement of N, P and K of cotton drip irrigation special fertilizer in soil and the fertilizer use efficiency[J]. Geographical Research, 2010, 29(2): 235 – 243. (in Chinese)
- 24 张丽娜, 李军, 范鹏, 等. 黄土高原典型苹果园地深层土壤氮磷钾养分含量与分布特征[J]. 生态学报, 2013, 33(6): 1907 – 1915.
Zhang Li'na, Li Jun, Fan Peng, et al. Distribution of soil NPK nutrient content in deep soil profile of typical deep apple orchard on the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(6): 1907 – 1915. (in Chinese)