

东北典型黑土区坡面土壤速效磷空间分布规律

梁佳辉, 张少良, 穆林林, 黄 静, 杨方益,
董 峰, 张新波, 蒙 亮, 沈庆松, 王 曜

(东北农业大学 资源与环境学院, 哈尔滨 150030)

摘 要:土壤速效磷是反映土壤供磷水平的重要指标,也是磷环境风险评价的重要参数,研究其空间分布规律可为农田合理施肥和生态环境治理提供依据。研究利用多条典型样带系统地揭示了典型黑土区 0—60 cm 剖面土壤速效磷水平和垂直方向分布规律。结果表明:研究区土壤速效磷(Olsen-P)含量为 0.57~50.01 mg/kg,耕层(0—20 cm)速效磷为 10~40 mg/kg,位于充足水平以上。垂直方向上,土壤速效磷从表土层 0—20 cm 处向深土层 50—60 cm 处减小。施肥降低了表土层速效磷的变异程度,侵蚀和沉积增加了深土层的变异程度(20—50 cm)。水平方向上,土壤速效磷总体沿坡向下呈下降趋势,侵蚀和沉积同时降低了坡背和坡底土壤速效磷的含量。

关键词:黑土; 样带; 剖面; 速效磷; 土壤侵蚀

中图分类号:S158

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)01-0090-06

Spatial Heterogeneity of Soil Available Phosphorus on Typical Slope in Black Soil of Northeastern China

LIANG Jiahui, ZHANG Shaoliang, MU Linlin, HUANG Jing, YANG Fangyi,
DONG Feng, ZHANG Xinbo, MENG Liang, SHEN Qingsong, WANG Yao

(College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Soil available phosphorus (AP) is the key factor used for assessment of phosphorus (P) availability and environmental risk. Understanding the spatial variability was helpful to improve the precision fertilization, and reduce and control environmental pollution. AP (Olsen-P) in 0—60 cm layers from four sample transects was measured, and the AP dynamics was summarized systematically in profiles and lengthways. The results indicated that AP content ranged from 0.57 mg/kg to 50.01 mg/kg in 0—60 cm soil depth. AP in 0—20 cm soil depth varied from 10 mg/kg to 40 mg/kg, and the soil productivity was at sufficiency level. In vertical directions, AP decreased from 0—20 cm to 50—60 cm soil layers. Fertilization decreased the variation in surface soil layer (0—20 cm), and soil loss and sediments increased the variation of deep soil layer (20—50 cm). In horizontal direction, AP decreased from summit to down slope, soil loss and deposition decreased AP on both back slope and bottom.

Keywords: mollisols; sample transect; soil profile; soil available phosphorus; soil erosion

东北黑土区是我国重要商品粮生产基地,其土壤肥力的维持和提升关系到该区域农业的可持续发展,以及国家粮食安全。土壤养分是土壤肥力的重要组成部分,研究其空间分布规律可为土壤养分管理和农业生态环境保护 and 治理提供依据^[1-2]。当前,关于黑土区土壤养分空间分布规律的研究主要集中在耕层

0—20 cm,且主要关注不同土地利用、气候、土壤、人为措施对其空间分布的影响^[3-5],而关于坡面土壤,特别是不同坡位剖面土壤养分的空间分布规律研究还鲜见报道。据报道东北黑土区作物根系在 0—70 cm 处土层左右均有分布,而且根密度在 0—45 cm 处占优势^[6]。研究表明人为剥离 20 cm 耕层土壤后合理

收稿日期:2016-03-12

修回日期:2016-04-16

资助项目:国家自然科学基金“冻融作用下侵蚀黑土耕层氮磷时空分异变化驱动机制研究”(41471228);东北农业大学“学术骨干”项目“冻融作用下黑土磷空间格局变化及主要驱动机制”(15XG08);黑龙江省普通本科高等学校青年创新人才培养计划“侵蚀黑土坡面速效氮时空格局变化的驱动机制研究”(UNPYSCT-2016011);大学生创新训练项目“冻融驱动下黑土磷空间格局变化特征研究”(201510224008)

第一作者:梁佳辉(1995—),男,黑龙江嫩江人,本科生,研究方向为黑土生态过程。E-mail:643508828@qq.com

通信作者:张少良(1980—),男,黑龙江五常人,博士,副教授,主要从事黑土农田景观生态过程研究。E-mail:shaoliang.zhang@neau.edu.cn

施肥种植大豆和玉米仍然可以维持一定产量或保持较高产量^[7],因此只分析耕层(0—20 cm)土壤养分分布特征和变化规律等不能很好地反映黑土区耕地资源质量现状。同时,由于土壤养分迁移受水流在重力和土壤颗粒对其阻力的双重作用下做不定向运动,致使不同坡位剖面土壤养分含量空间分布存在差异^[8]。因此,研究不同坡位根系土壤剖面土壤养分空间分布规律对指导农业生产和促进农业可持续发展有重要意义。磷素是植物生长的三大主要营养元素之一,是作物生长必须的营养成分,尤其土壤中的速效磷与当季作物生长状况密切相关,它可作为衡量目前乃至近期内可供植物吸收利用的磷素水平,是衡量土壤磷素养分供应能力的可靠指标^[9],研究其在土壤中的分布规律对指导农业生产有重要的现实意义^[10]。

本研究利用典型黑土区坡面的 4 个样带研究沿坡向分布的多个剖面(0—60 cm)土壤速效磷(Olsen-P)的

立体空间分布特征,旨在为黑土区农田土壤养分管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江省海伦市前进乡光荣小流域(47°21′12.61″N,126°50′01.42″E),地形为漫川漫岗,土壤类型为典型黑土中的黄土质黑土,其基本理化性状见表 1。原始自然植被为草原化草甸植物,俗称“五花草塘”,当前主要以玉米大豆轮作为主,一年一熟制。该区位于温带,属寒温带大陆性季风气候区,冬季寒冷干燥,夏季温热多雨,年均气温 1.5℃,极端最高温度为 37℃,极端最低温度为-39.5℃,多年平均降水量 530 mm,年均有效积温 2 450℃,年均日照时数为 2 600~2 800 h,无霜期为 125 d,地下水水位埋深 10~20 m。

表 1 研究区土壤基本理化性状

土层深度/cm	有机质/(g·kg ⁻¹)	容重/(g·cm ⁻³)	总孔隙度/%	田间持水量/%	饱和含水量/%	枯萎含水量/%
0—20	42.1	1.27	52.1	24.4	42.3	12.1
20—40	28.4	1.19	55.1	24.4	44.2	13.4
40—60	18.6	1.21	54.3	23.4	43.6	14.2

1.2 试验设计

本研究于 2012 年秋在光荣小流域内选择了一处典型的面向东南方向的坡面,沿着坡向分别设计了 4 条样带 A、B、C 和 D,分别沿着样带从坡顶向坡脚以间隔 70—100 m 选择有代表性位置挖掘土壤剖面(0—60 cm),并分层收集 0—20,20—30,30—40,40—50,50—60 cm 土壤样品。其中样带 A、B 和 C 坡度相近(13°~15°),坡长 A<B<C,坡长越长坡面复杂程度越高,可用来对比坡度相近、坡长不同条件下土壤 AP 变化规律;样带 D 所有剖面均位于接近坡顶的位置,坡度较小,坡长与 A 相近,可用来对比坡长相近坡度不同条件下土壤 AP 变化规律。耕层 0—20 cm 土样,采用五点法采集,混均后四分法收集装袋,并用手持高精度 GPS 定位中心点坐标;20—30,30—40,40—50,50—60 cm 土壤样品,在耕层采样中心点位置竖直向下挖掘土壤剖面 0—70 cm,然后分层收集 0—60 cm 剖面土壤样品。所有样品均在阴凉处风干,装瓶待用。样带 A 包括坡顶 a₁、坡肩 a₂、坡背 a₃、坡背 a₄ 和坡脚 a₅ 共 5 个土壤剖面(a₅ 样点下方为林地,故未采取样点);样带 B 为复合坡,包括坡顶 b₁、坡肩 b₂、坡背 b₃、坡背 b₄、坡肩 b₅、坡背 b₆ 和坡脚 b₇ 共 7 个土壤剖面(b₇ 样点下方为林地,故未采取样点);样带 C 为复合坡,包括坡顶 c₁、坡肩 c₂、坡背 c₃、坡背 c₄、坡肩 c₅、坡背 c₆、坡脚 c₇ 和坡趾 c₈ 共 8 个土壤剖面;样带 D 包括 a₁,

d₁, b₁ 和 c₁ 共 4 个剖面,见图 1。

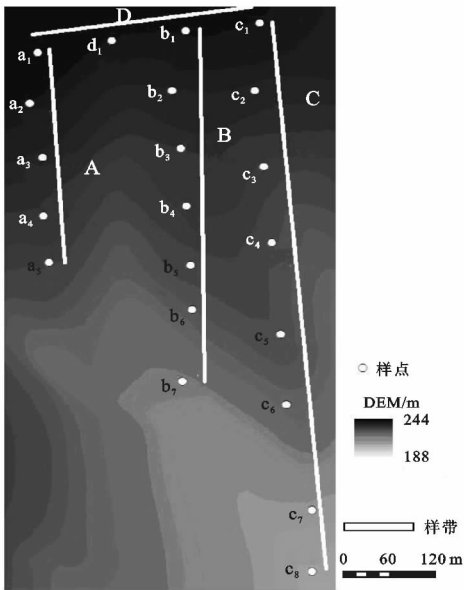


图 1 研究区样带分布

南北走向的样带从东向西分别为样带 A、B 和 C,样点序号从北向南逐渐增加;样带 D 呈东西走向,样点序号从西向东逐渐增加

1.3 测定方法和数据处理

(1) 速效磷测定采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提—钼锑抗比色法^[11]。

(2) 土壤侵蚀计算研究区整个小流域土壤侵蚀空间分布图已经通过修正后的完全基于 ArcGIS 的

USLE 模型计算获得^[12], 见图 2, 然后通过 ArcGIS 中点要素提出软件包获得相对应的土壤侵蚀量。

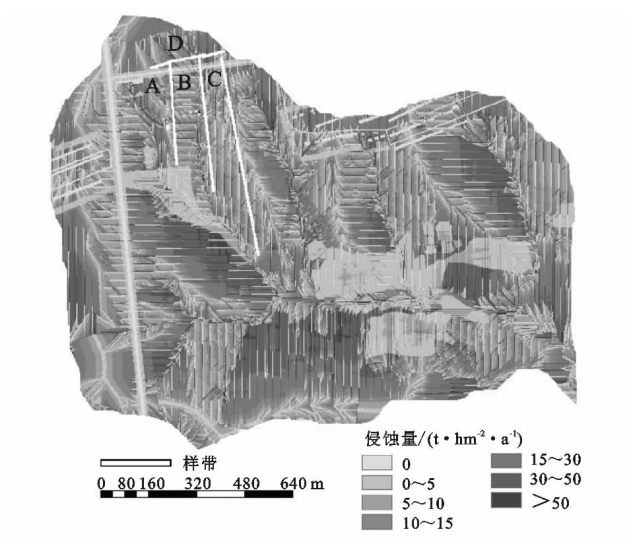


图 2 研究区土壤侵蚀空间分布

(3) 数据分析。常用参数在 Excel 2003 中计算,

方差分析在 SPSS 12.0 中进行, 作图在 Sigmaplot 10.0 和 ArcGIS 10.0 中完成。

2 结果与分析

2.1 土壤速效磷剖面空间变化规律

研究区样带剖面土壤速效磷含量为 0.57~50.01 mg/kg(表 2), 其中 0—20, 20—30, 30—40, 40—50, 50—60 cm 土层速效磷含量分别为 6.51~50.01, 1.82~34.60, 0.57~28.47, 2.19~33.25, 2.24~16.44 mg/kg。各样带土壤速效磷平均值多是从表土层 0—20 cm 处向 50—60 cm 处减小, 特别是在表土层 0—30 cm 下降趋势较大, 并在 B 剖面 0—20 cm 与 30—60 cm 土层, 以及在 D 剖面 0—20 cm 与 30—40, 50—60 cm 土层达到显著差异水平。极差除样带 A, 从表土层 0—20 cm 向 50—60 cm 处逐渐降低, 其他样带无明显规律变化。变异系数均是靠近表土层和深土层处低, 中间较高。

表 2 剖面土壤速效磷描述性分析

样带	样带垂直 投影长/m	剖面数	剖面 深度/cm	平均值/ (mg·kg ⁻¹)	最大值/ (mg·kg ⁻¹)	最小值/ (mg·kg ⁻¹)	极差/ (mg·kg ⁻¹)	变异 系数
A	315	5	0—20	21.39a	41.19	6.51	34.68	0.79
		5	20—30	14.35a	34.60	1.82	32.78	1.10
		5	30—40	11.63a	28.47	3.44	25.02	0.97
		5	40—50	9.69a	23.36	3.96	19.41	0.85
		5	50—60	7.30a	14.03	2.79	11.23	0.61
B	530	7	0—20	13.48a	24.10	7.76	16.34	0.45
		7	20—30	8.96ab	20.95	2.75	18.20	0.78
		7	30—40	5.81b	16.07	2.19	13.88	0.84
		7	40—50	5.00b	7.16	3.12	4.04	0.30
		7	50—60	4.28b	6.69	2.28	4.41	0.33
C	761	8	0—20	11.41a	26.52	6.79	19.73	0.55
		8	20—30	8.75a	11.75	2.66	9.10	0.36
		8	30—40	6.33a	14.91	0.57	14.35	0.83
		8	40—50	8.37a	28.10	2.19	25.91	1.00
		8	50—60	8.01a	16.44	2.24	14.21	0.53
D	294	4	0—20	34.10a	50.01	18.67	31.34	0.41
		4	20—30	22.70ab	34.60	8.74	25.86	0.54
		4	30—40	14.98b	28.47	0.57	27.90	0.86
		4	40—50	15.96ab	33.25	3.03	30.22	0.93
		4	50—60	9.25b	14.31	3.68	10.63	0.62

注:“大写字母”代表样带序号,同一样带同一列相同“小写字母”标记数值处于不显著水平($p<0.05$)。

各样带除剖面 c₃—坡背、c₇—坡脚和 c₈—坡趾外,土壤速效磷变化趋势均由 0—20 cm 向深土层逐渐降低,通常靠近表土层波动较大,深层波动较小,相邻坡面变化趋势相近(图 3)。各样带坡顶 AP,均是由 0—20 cm 向 50—60 cm 处递减,且幅度最大,如样带 A 的坡顶 a₁ 和 a₂,样带 B 的 b₁ 和 b₂,样带 C 的 c₁ 和 c₂,样带 D 的 a₁ 和 d₁。除坡顶外,其他坡位土壤

AP 的垂直变化规律相近,呈“S”型变化曲线,整体由上向下递减。样带 B 和 C 较长,相对较短样带 A 和 D 变化较为复杂,属于复合坡类型,两个样带均在坡背、坡脚和坡趾处土壤 AP 含量和变化规律最为接近;样带 C 相对样带 B 变化规律复杂,特别是样带 C 的 c₃, c₄ 和 c₇ 剖面规律变化比较复杂。样带 A 和 D 坡长相近, A 的坡度相对较大,但是两个样带剖面变

化规律相近,位于样带 A 靠近坡顶的 a_1 和 b_1 剖面,以及位于样带 D 靠近坡顶的 d_1 剖面 AP 含量整体较高,下降幅度较大,但 d_1 变化相对复杂;位于样带 A

的 a_3, a_4, a_5 , 和位于样带 D 的 b_1 和 c_1 变化规律相近,整体先降低后逐渐增加,但 A 样带剖面靠近坡底剖面 AP 变异程度相对较低。

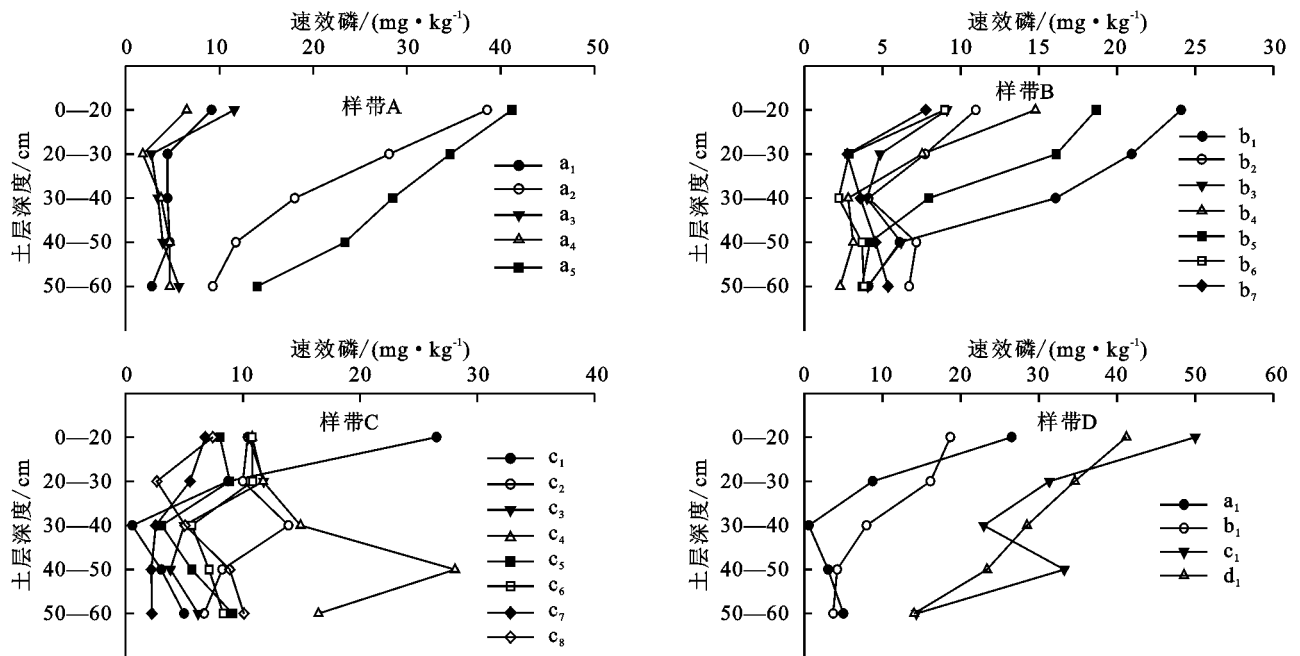


图3 剖面土壤速效磷垂直(水平)空间变化趋势

2.2 坡面土壤速效磷水平空间变化规律

样带 A, B, C 和 D 的土壤速效磷总体沿坡向向下呈现下降趋势(图 4)。样带 A 和 D 下降趋势变化幅度相对较大,样带 B, C 下降趋势幅度相对较小,个别土层有所上升。同一样带各土层相隔越近速效磷沿坡向变化趋势越接近,其中靠近深层土壤波动相对较小,规律相似。样带 A 和 D 剖面 0—40 cm 各土层靠近坡顶和坡肩其速效磷含量较高,整体变异幅度较大。样带 B 和 C 剖面 0—60 cm 各土层靠近坡顶其速效磷整体较高,样带 B 土层速效磷在坡肩处最高,样带 C 土层速效磷沿坡向呈波动式整体逐渐降低。样带 B 和 C 整体变异程度相对 A 和 D 较弱。除样带 A 外, B, C 和 D 在 40—50, 50—60 cm 土层沿坡向变化规律基本一致,均是坡顶处较小,然后逐渐升高,至坡肩(样带 C 为坡背)处达到最高,然后逐渐下降,中间随坡长变化不定向出现几次起伏,而后在坡脚或坡趾处增高或降低。

3 讨论

黑土是我国肥力较高的土壤之一,随着开垦年限增长和磷肥施用,土壤表层有效磷明显增加^[13]。虽然研究区以施氮肥为主,磷肥为辅,耕层土壤(0—20 cm)速效磷含量均值还是处于 10~40 mg/kg,位于充足水平以上^[14]。

垂直方向上,速效磷从表土层向深土层逐渐降

低,一方面是由于磷在土壤中易被固定,施入土壤中的磷有效性很低^[15],不易渗入深土层;另一方面作物根系在表层分布比例大,向深层逐渐减少,对养分吸收能力逐渐降低^[16]。水平方向上,大部分土层速效磷沿坡面向下总体呈下降趋势,在短坡上(A 和 D)下降幅度较大,在复合坡上(B 和 C)变化较复杂,特别是变异系数变化较大,这主要是由黑土区特定地形引起的。黑土区典型地形为漫川漫岗,地势起伏^[17],导致降水径流、渗透、水蚀、耕作侵蚀等在不同坡位差异较大^[18];坡背受多年较强侵蚀和径流的影响,土壤磷素水平较低,同时坡背相对贫瘠的土壤不断沉积在坡底,降低了坡底速效磷的含量,使速磷总体呈下降趋势;通常长坡复杂地形比短坡地形水分和土壤运动复杂,进一步增加其沿坡向向下方向分布的不确定性^[19]。通常表层土壤(0—20 cm)主要受施肥的影响,故而变异程度较低,而深层土壤变异程度较低主要是由于黑土区土壤粘重、透水性差,施入土壤中的磷素主要被固定和吸附在表土层,对深层的影响较小。中间土层土壤速效磷沿坡面向下变异程度较大,主要是由于坡顶侵蚀程度较轻,坡背侵蚀程度较重,坡底主要表现为沉积,且研究区黑土层平均厚度小于 30 cm,故而增加了其不同坡位相同深度的较大差异。除样带 D 外,各样带 40—50 cm 和 50—60 cm 土层土壤养分沿坡面变化规律相近,这也是因为其受外界因素影响相对较少的缘故。

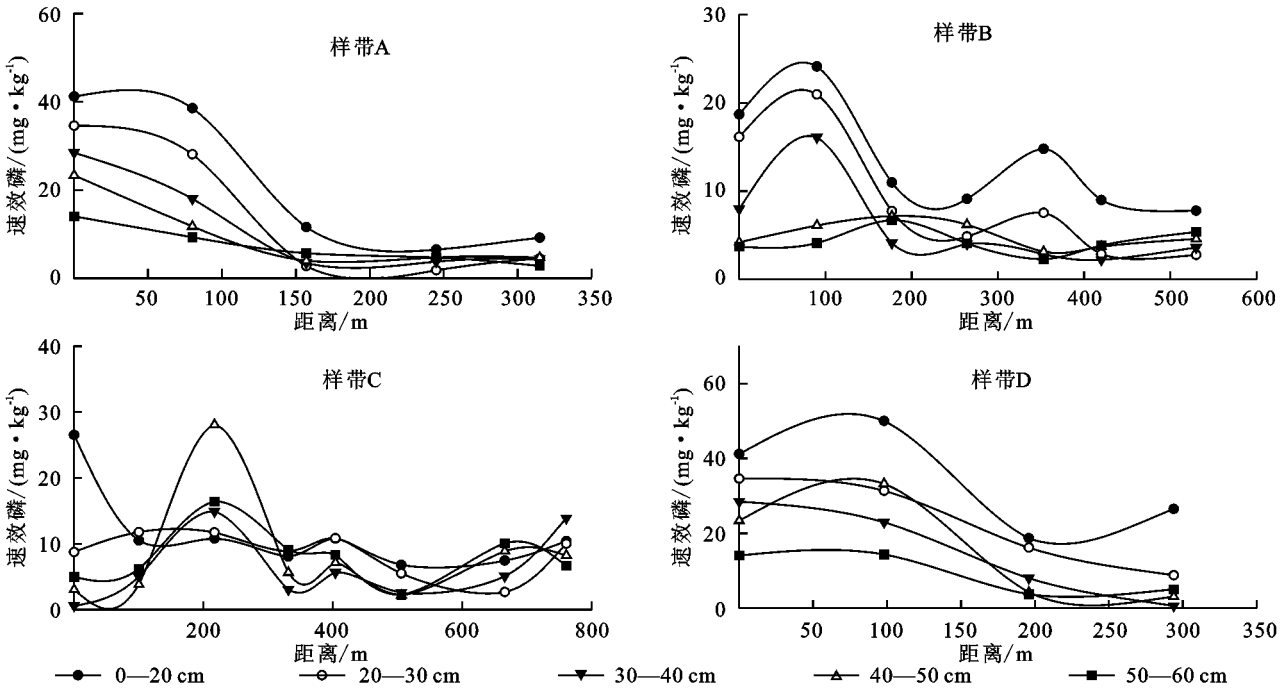


图 4 不同土层速效磷沿坡面向下水平空间变化趋势

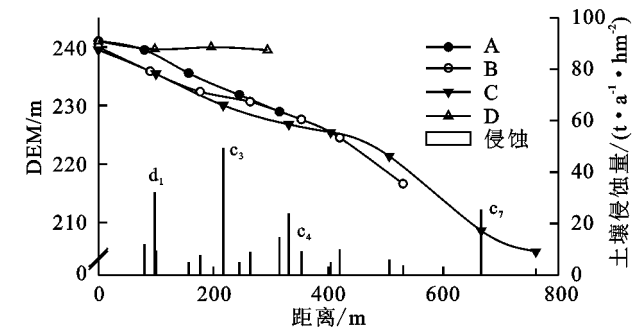
表 3 剖面各层土壤速效磷之间相关性 及与速效磷与土壤侵蚀、高程之间的相关性

样带	土层深度	0—20 cm	20—30 cm	30—40 cm	40—50 cm	50—60 cm
A	20—30 cm	0.964 *	1			
	30—40 cm	0.787	0.921 *	1		
	40—50 cm	0.530	0.731	0.939 *	1	
	50—60 cm	0.454	0.674	0.903 *	0.983 **	1
	高程	0.288	0.045	—0.341	—0.642	—0.656
	侵蚀量 ^①	0.839	0.896	0.898	0.792	0.680
B	20—30 cm	0.963 **	1			
	30—40 cm	0.789 *	0.901 **	1		
	40—50 cm	—0.395	—0.235	0.125	1	
	50—60 cm	—0.490	—0.289	—0.043	0.798 *	1
	高程	—0.083	—0.328	—0.436	—0.403	—0.686
	侵蚀量	—0.518	—0.695	—0.675	0.121	—0.101
C	20—30 cm	—0.128	1			
	30—40 cm	—0.089	0.721 *	1		
	40—50 cm	—0.207	0.345	0.839 **	1	
	50—60 cm	—0.271	0.276	0.692 *	0.913 **	1
	高程	—0.364	0.050	—0.372	—0.294	—0.368
	侵蚀量	—0.485	0.010	0.531	0.855 **	0.894 **
D	20—30 cm	0.918	1			
	30—40 cm	0.978	0.981	1		
	40—50 cm	0.947	0.997 *	0.993 *	1	
	50—60 cm	0.992 *	0.860	0.943	0.899	1
	高程	—0.806	—0.975	—0.912	—0.953	—0.724
	侵蚀量	0.915	1.000 **	0.979	0.996 *	0.857

注：^①表示由降雨所造成的侵蚀，**表示在 0.01 水平上显著相关，*表示在 0.05 水平上显著相关。

通常认为土壤侵蚀与土壤速效磷呈显著负相关关系^[20]，本研究发现在研究区水蚀造成的土壤侵蚀与各土层速效磷含量之间既存在负相关关系，也存在显著正相关关系(表 3)，分析认为是由于研究区坡面

侵蚀比较复杂,包括降雨侵蚀、耕作侵蚀和风蚀等,特别是坡顶位突兀处耕作侵蚀对坡面侵蚀影响较大,而且黑土区侵蚀与沉积相伴发生^[21]。同时农田土壤养分管理,包括施肥、种植制度、耕作方法等均不同程度影响和降低土壤速效磷与侵蚀量之间的相关关系^[10,13]。研究区水蚀主要发生在坡背,特别是坡度较陡区域(图 5),这也是土壤速效磷在此处较低的原因。由于研究区样带 A 和 D 的坡顶多分布着平整的土地,其水蚀和耕作侵蚀都相对较少,因此土壤速效磷含量在坡顶相对其他位置含量较高。然而位于样带 B 和 C 坡顶的剖面 b_1 和 c_1 同时属于样带 D 的坡背和坡脚,受水蚀和耕作侵蚀强度都相对较大,因此其速效磷含量相对 A 和 D 坡顶低;而在坡肩、坡脚、坡趾处地势相对平坦,水蚀和耕作侵蚀也都相对减少,速效磷含量也相对升高。虽然本研究认为侵蚀是影响研究区土壤速效磷的主要原因之一,但是本研究暂时只能通过修订后的土壤流失方程(USLE)^[22]来估算区域土壤侵蚀格局,未能将重要的耕作侵蚀包含在内,所以侵蚀与速效磷之间相关性未达到显著水平,因此未能构建出土壤侵蚀与土壤速效磷的回归方程,此部分内容还需要进一步研究,但是在土壤侵蚀量较大的坡位 d_1 , c_3 , c_4 和 c_7 处剖面土壤 AP 的变异程度是最大的,其变化规律也是最复杂的;同时本研究结果显示坡长越长剖面变化规律相差越大,坡长相近坡度不同虽然剖面 AP 整体变化规律相近,但靠近坡底剖面 AP 变化有较大差异,这些都证明侵蚀是影响土壤 AP 空间分布的重要因素之一。研究区除位于坡顶的样带 A 外,土壤速效磷均与高程呈负相关关系,但未达到显著相关水平,分析是受侵蚀在坡面分布格局的影响。由表 3 可以看出,相邻土层通常相关性较强,不相邻土层相关性较弱甚至存在负相关。



注: A、B、C 和 D 曲线分别为各样带 DEM 的变化趋势, d_1 , c_3 , c_4 , c_7 分另代表其对应坡位的侵蚀量。

图 5 样带坡型变化

4 结论

(1) 研究区土壤速效磷处于 0.57~50.01 mg/kg, 土壤耕层(0—20cm)速效磷含量均值处于 10~40

mg/kg, 含量处于充足水平以上。

(2) 垂直方向上, 各样带土壤速效磷平均值一般是从表土层 0—20 cm 处向深土层 50—60 cm 处减小, 特别是在表土层 0—30 cm 下降趋势较大。施肥降低了表土层变异程度, 深土层受外界影响较小变异程度也较低。

(3) 水平上, 土壤速效磷总体沿坡向向下呈下降趋势, 侵蚀和沉积同时降低了坡背和坡底土壤速效磷的含量, 且与施肥等管理因素共同影响不同坡位各土层剖面速效磷的变异性。

(4) 受施肥、耕作、种植、沉积等因素的影响, 很难用基于 USLE 模型模拟的土壤侵蚀量预测土壤速效磷的空间分布特征。

致谢: 感谢东北农业大学刘威、张志强、张书豪等在野外采样、室内分析和数据处理方面的帮助。

参考文献:

- [1] 刘宝元, 阎百兴, 沈波, 等. 东北黑土区农地水土流失现状与综合治理对策[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(1): 1-8.
- [2] 何艳芬, 马超群. 东北黑土资源及其农业可持续利用研究[J]. 干旱区资源与环境, 2003, 17(4): 24-28.
- [3] 张少良, 张兴义, 崔战利. 哈尔滨市辖区黑土有机质、全氮的空间异质性分析[J]. 农业系统科学与综合研究, 2007, 23(3): 333-337.
- [4] Zhang S, Zhang X, Huffman T, et al. Influence of topography and land management on soil nutrients variability in Northeast China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2011, 89(3): 427-438.
- [5] Zhang X Y, Sui Y Y, Zhang X D, et al. Spatial Variability of Nutrient Properties in Black Soil of Northeast China[J]. Pedosphere, 2007, 17(1): 19-29.
- [6] 金剑, 王光华, 刘晓冰, 等. 东北黑土区高产大豆 R5 期根系分布特征[J]. 中国油料作物学报, 2007, 29(3): 266-271.
- [7] Sui Y, Liu X, Jin J, et al. Differentiating the early impacts of topsoil removal and soil amendments on crop performance/productivity of corn and soybean in eroded farmland of Chinese Mollisols[J]. Field Crops Research, 2009, 111(3): 276-283.
- [8] 张少良. 水土保持措施对黑土水土流失过程的影响及其效益评价[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.
- [9] 张世熔, 黄元仿, 李保国, 等. 黄淮海冲积平原区土壤速效磷、钾的时空变异特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(1): 3-8.
- [10] Brady N, Weil R. The Nature and Properties of Soils [M]. Upper Saddle River, USA: Prentice Hall, 1996.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.

- [3] Makkonen, Hellen H, Anttila P, et al. Size distribution and chemical composition of airborne particles in south-eastern Finland during different seasons and wild-fire episodes in 2006[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(3): 644-651.
- [4] 韩冰雪, 张国华, 毕新慧, 等. 广州城区夏季大气颗粒物数浓度谱分布特征[J]. *环境科学研究*, 2015, 28(2): 198-204.
- [5] 穆桂金, 贺俊霞, 雷加强, 等. 再议绿洲—沙漠过渡带: 以策勒绿洲—沙漠过渡带为例[J]. *干旱区地理*, 2013, 36(2): 195-202.
- [6] 常铁深, 钱亦兵, 王忠臣, 等. 艾比湖地区南北典型断面的土壤力度特征[J]. *干旱区地理*, 2012, 35(6): 968-977.
- [7] 马晓飞, 楚新正, 马倩. 艾比湖地区冻融作用对梭梭群落土壤酶活性及微生物数量的影响[J]. *干旱区地理*, 2015, 38(6): 1190-1201.
- [8] 吉力力·阿不都万里, 穆桂金. 艾比湖干涸湖底尘暴及其灾害分析[J]. *干旱区地理*, 2002, 25(2): 149-154.
- [9] 田涛. 艾比湖“撒盐”经济带“抽搐”[N]. *中国环境报*, 2001-05-15(2).
- [10] 霍文, 何清, 杨兴华, 等. 中国北方主要沙漠沙尘粒度特征比较研究[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(6): 6-11.
- [11] 毛东雷, 雷加强, 曾凡江, 等. 策勒绿洲—沙漠过渡带风沙活动强度的空间分布特征[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(2): 13-19.
- [12] 霍文, 何清, 杨兴华, 等. 塔里木盆地多种沙源类型沙通量异变特征研究[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(5): 102-125.
- [13] 何学敏, 吕光辉, 秦璐, 等. 艾比湖荒漠—湿地生态系统非生长季碳通量数据特征[J]. *生态学报*, 2014, 34(22): 6655-6665.
- [14] 毛吉旦木·地力夏提. 艾比湖湿地典型区表层土壤粒度空间分布特征[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2014.
- [15] Li Han, Guo Bin, Han Mengfei, et al. Particulate matters pollution characteristic and the correlation between PM($PM_{2.5}$, PM_{10}) and meteorological factors during the summer in Shijiazhuang [J]. *Journal of Environmental Protection*, 2015, 6(11): 457-463.
- [16] 赵文慧, 宫辉力, 赵文吉, 等. 基于地统计学的北京市可吸入颗粒物时空变异性及气象因素分析[J]. *环境科学学报*, 2010, 30(11): 2154-2163.
- [17] 李红军, 杨青, 何清. 艾比湖地区的输沙势分析[J]. *干旱区研究*, 2003, 20(4): 322-325.
- [18] 赵明, 詹科杰, 杨自辉, 等. 民勤沙漠—绿洲低空沙尘暴结构特征研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41(2): 234-242.
- [19] 刘昌伟, 赵勇, 苗蕾, 等. 城市高层建筑大气颗粒物污染和噪声垂直分布特征[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(5): 1793-1797.
- [20] Karar K, Gupta A K, Kumar A, et al. Characterization and identification of the sources of chromium, zinc, lead, cadmium, nickel, manganese and iron in PM_{10} particulates at the two sites of Kolkata, India[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006, 120(1/3): 347-360.
- [21] Whiteaker J, Suess D, Prather K. Effects of meteorological conditions on aerosol composition and mixing State in Bakersfield, CA [J]. *Environmental Science and Technology*, 2002, 36(11): 2345-2353.
- [22] 李沐珂, 沈振兴, 李旭祥, 等. 西安市可吸入颗粒物污染水平及其与气象条件的关系[J]. *过程工程学报*, 2006, 6(S2): 15-19.



(上接第95页)

- [12] 张少良, 刘威, 张兴义, 等. 黑土区典型小流域土壤侵蚀空间格局模拟研究[J]. *水土保持通报*, 2013, 33(4): 224-227.
- [13] 辛刚, 关连珠. 不同开垦年限黑土磷素的形态与数量变化[J]. *土壤通报*, 2002, 33(6): 425-428.
- [14] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查技术[M]. 北京: 农业出版社, 1992.
- [15] Greenwood D J, Cleaver T J, Turner M K, et al. Comparison of the effects of phosphate fertilizer on the yield, phosphate content and quality of 22 different vegetable and agricultural crops[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 1980, 95(2): 457-469.
- [16] 苏德纯. 从土壤中磷的空间分布特征探讨提高磷肥及土壤磷有效性的新途径[J]. *磷肥与复肥*, 1995, 10(3): 74-76.
- [17] 何万云, 张之一, 林伯群. 黑龙江土壤[J]. 北京: 农业出版社, 1992.
- [18] Morgan R. *Soil Erosion and Conservation*[M]. Manhattan, USA: John Wiley & Sons, 2009.
- [19] Pratt P F. Potassium removal from Iowa soils by greenhouse and laboratory procedures[J]. *Soil Science*, 1951, 72(2): 107-118.
- [20] 何长高, 尹忠东. 紫色土区土壤侵蚀对土地生产潜力的影响研究[J]. *水土保持学报*, 2001, 15(4): 110-114.
- [21] 葛方龙, 张建辉, 苏正安, 等. 坡耕地紫色土养分空间变异对土壤侵蚀的响应[J]. *生态学报*, 2007, 27(2): 459-464.
- [22] 陈永宝, 黄传伟, 陈志伟, 等. USLE 在我国的应用和发展[J]. *中国水土保持*, 2003(10): 11-13.