

柴河流域典型景观类型土壤氮磷含量的空间变异特征^①

吴晓妮^{1,3}, 付登高^{2*}, 刘兴祝^{1,3}, 宗德志¹, 刘永权¹

(1 云南省高校特色生物资源开发与利用重点实验室, 昆明 650214; 2 云南大学环境科学与生态修复研究所, 昆明 650091;

3 昆明市滇池水生态恢复重点实验室, 昆明 650214)

摘 要: 为了从流域尺度了解柴河流域土壤氮、磷含量的空间变异特征, 在柴河流域选择 6 个景观类型, 并根据每个景观类型内不同土地利用方式及景观位置, 共进行了 72 个样点的表层土壤采集, 并对土壤有机质、氮、磷含量进行了测定。结果表明, 磷素主要以磷矿区及富磷区林地区域含量较高, 其中磷矿区土壤全磷含量平均高达 20 g/kg, 富磷区林地有效磷含量平均为 3 687.7 mg/kg; 而氮素则表现为沟渠和柴河河道底泥的含量较高, 柴河底泥中全氮及碱解氮含量高达 2.99 g/kg 和 631.8 mg/kg。相同景观类型下不同土地利用方式土壤氮磷含量在富磷区、坡耕地及坝平地均表现出较高的差异。嵌套方差分析表明景观类型及土地利用方式或所处的景观位置对土壤有机质及氮磷含量均具有显著的影响。以上结果表明柴河流域内土壤养分含量空间变异程度较高, 不同景观类型和土地利用方式共同决定了土壤氮磷含量的变异。因此, 在面源污染输移风险评估及防控时应同时结合景观类型及土地利用类型进行分析, 并在此基础上探讨主要影响因素。

关键词: 柴河流域; 景观类型; 土地利用方式; 土壤养分含量

中图分类号: S158; S181

中国湖泊水体富营养化现象日趋严重, 其中面源污染成为湖泊污染削减和环境治理的难题^[1-2]。从流域尺度研究非点源污染物氮、磷流失是目前国内外的热点。土壤氮素与磷素作为生态系统中极为重要的生态因子, 在不同景观类型及土地利用方式下由于土壤动植物群落数量性质有较大差异, 且耕作制度与管理措施各异, 直接影响到土壤中氮磷的矿化、运输与植物的吸收, 最终造成土壤氮、磷含量的诸多不确定性^[3-5]。因此, 土壤中氮磷含量的高低一定程度上能够反映土壤对水体富营养化的贡献潜力。相关研究表明流域氮磷物质的输出与景观格局、土地利用及管理等相关^[6-8], 受区域景观格局及土地覆盖类型的影响这种相关存在一定的空间差异^[9-10]。目前大多数研究关注不同尺度下土地利用方式或景观类型之间土壤氮磷含量的比较分析, 如在流域尺度对坝平地、大棚土壤、林地、坡耕地、台地、湖滨土壤 6 种不同景观类型土壤氮磷的研究^[11], 在农村尺度下对不同土地利用方式对土壤氮磷的影响^[12]。但在大多数

较宏观尺度上, 虽景观类型与土地利用方式多存在相似之处, 但二者仍存在一定的差异。相同景观类型下可能存在不同的土地利用方式, 同一土地利用方式可能处于不同景观类型单元内。因此, 结合景观类型及土地利用方式探讨土壤氮磷含量的变化能更好地指导流域内土地利用方式及景观格局的优化及其对径流水质的管理。

柴河是滇池重要入湖河流之一, 其柴河流域占滇池流域总面积的 7.5%。流域内面源污染问题突出, 且存在大量的富磷矿区、林地、台地、农业种植区等多种景观单元, 每种景观类型单元内存在不同土地覆被方式, 已有研究对不同景观类型的径流氮磷含量进行了报道^[11], 但流域内景观类型及不同土地利用方式对其贡献还不明晰。因此, 在流域尺度上了解不同景观类型及各个景观类型内不同土地覆被或景观位置条件下的土壤含量变化特征对了解景观格局对氮磷输出的影响, 建立流域土地利用景观格局与氮磷输出的关联, 实现小流域最佳管理模式将提供一定科学依据。

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07102-003)、国家自然科学基金项目(31360152)、云南省应用基础研究项目(2014FD040)、昆明学院校级科研项目(XJL13012)和云南省高校特色生物资源开发与利用重点实验室开放基金项目(GXKM201506)资助。

* 通讯作者(dgfu@ynu.edu.cn)

作者简介: 吴晓妮(1987—), 女, 陕西镇安人, 硕士, 助教, 主要研究方向为面源污染防控及生态修复。E-mail: wuxiaoxiaoni@163.com

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区位于云南省中部、滇池南岸的晋宁县,属于滇池流域的柴河子流域,地理位置 $24^{\circ}36' \sim 24^{\circ}37'N$, $102^{\circ}41' \sim 102^{\circ}42'E$, 海拔 $1\,936 \sim 2\,236\text{ m}$, 属丘陵地带,亚热带高原季风气候。多年平均年降水量 900 mm , 降雨量年内分配极不均匀,具有干、湿季分明的气候特点,雨季(5—10月)受孟加拉湾和北部湾海洋暖湿气流的影响,降雨丰沛,平均降雨量为 780 mm , 降水量占全年降雨量的 86.7% , 该时期的降雨能形成较明显的地表径流,加上较强的人为农业活动,易形成比较严重的面源污染;干季(10月至次年4月)受印度大陆干暖气流和我国北部干冷气流的影响,干旱少雨,平均降雨量为 120 mm , 降水量占全年降雨量的 13.3% 。柴河自东南向西北汇入滇池,全长 48 km , 流域面积为 306 km^2 。该区域主要景观类型以山地、坡耕地、坝平地为主,其中大多数山地位于晋宁磷矿带上。该区域土壤类型为山地黄红壤、棕红壤。

1.2 样品的采集及试验方法

本研究在前期调查的基础上,结合研究目的及流域现实地形地貌特点,选择6种景观类型,分别为磷矿区、富磷区林地、坡耕地、坝平地、农田沟渠及柴河河道。根据每个景观类型结构特点,在每个景观类型下结合土地利用方式及所处的景观位置又进行了二次分类,分类及土壤采样数量为:磷矿区为磷矿开采废弃地($n=5$);富磷区林地根据土地覆被情况包括云南松林($n=3$)、华山松林($n=3$)、针阔混交林($n=3$)、旱冬瓜林($n=3$)及桉树林($n=3$);坡耕地根据土地利用方式分为露天蔬菜($n=6$)、露天作物($n=6$)及经果林($n=4$);坝平地根据土地利用方式分为露天蔬菜($n=6$)、设施大棚蔬菜($n=6$)及设施大棚花卉($n=6$)3种;沟渠根据所处景观位置不同分为大棚区农田沟渠($n=6$)和露天区农田沟渠($n=6$);柴河河道根据所处景观位置分为上游($n=3$)和下游($n=3$)进行河道土壤底泥取样。总计6个景观类型、15个土地利用方式或景观位置,共采集 $0 \sim 20\text{ cm}$ 层土壤样品72个,所有样品带回实验室自然风干后进行分析。其中土壤全氮采用半微量凯氏定氮法测定,土壤碱解氮采用碱解扩散吸收法测定,土壤全磷采用酸溶-钼锑抗比色法测定,土壤有效磷采用双酸浸提-钼锑抗比色法测定,土壤有机质采用重铬酸钾氧化外加加热法测定^[13]。

1.3 数据分析

利用方差分析说明不同景观类型土壤养分之间

的差异,并根据平均值及标准差计算变异系数。另外利用方差分析对相同景观类型下不同土地利用方式下土壤养分含量进行差异分析。利用嵌套方差分析对景观类型及土地利用方式或景观位置对土壤养分的影响进行了统计。为了了解景观类型之间及相同景观类型下不同土地利用方式或景观位置条件下土壤综合养分含量的高低,根据系统摄动分析评价原理,把不同类型土壤作为被选系统,土壤全氮、碱解氮、全磷、有效磷、有机质作为分析指标,权重向量按照等权重,所有指标类型越大越好,根据摄动分析原理摄动值越低,表明其综合养分含量就越高,摄动分析原理及分析方法参见参考文献[14]。

2 结果与分析

2.1 不同景观类型土壤养分含量及其空间变异特征

不同景观类型土壤氮、磷含量及其空间变异特征见表1,从表1可以看出:有机质平均含量以富磷区林地含量最高,磷矿区有机质最低,其空间变异以富磷区林地的有机质变异程度最高,而磷矿区的空间变异最小。对氮素而言,柴河底泥的氮素含量最高,磷矿区的氮素含量最低,空间变异程度以磷矿区变异程度最大;对磷素而言,磷矿区和富磷区林地的磷素含量较高,坝平地的磷素含量较低,空间变异程度以富磷区林地变异程度最大。摄动分析结果表明不同景观类型土壤综合肥力高低顺序依次为:富磷区林地>柴河底泥>沟渠底泥>磷矿区>坝平地>坡耕地,其中坝平地与坡耕地综合肥力相当(表1)。

2.2 相同景观类型下不同土地利用方式或所处景观位置土壤养分含量变异特征

相同景观类型下不同土地利用方式或所处景观位置土壤养分含量变异特征见表2。其中富磷区桉树林所有土壤养分含量均最低,磷素含量以云南松林最高,针阔混交林的有机质及全氮含量最高,碱解氮含量以旱冬瓜林最高。综合5种养分摄动分析表明富磷区不同植物群落土壤综合肥力顺序为:云南松林>华山松林>针阔混交林>旱冬瓜林>桉树林,其中云南松林与华山松林土壤综合肥力相当,针阔混交林和旱冬瓜林综合肥力相当,桉树林综合最差。

坡耕地不同土地利用方式中有机质含量露地蔬菜显著高于露地作物和经果林;全氮含量露地农田显著高于经果林,但碱解氮恰好相反,经果林的碱解氮含量显著高于露地蔬菜和作物;全磷含量以经果林最高,有效磷则表现为露地作物最高;摄动分析表明坡耕地不同土地利用方式土壤综合肥力顺序为:露地蔬菜>露地作物>经果林。

表 1 不同景观类型土壤氮、磷含量
Table 1 Soil nutrient contents of the different landscape types in Chaihe Catchment

项目		磷矿区	富磷区林地	坡耕地	坝平地	沟渠底泥	柴河底泥
有机质 (g/kg)	平均值	18.2 b	38.4 a	21.7 ab	34.0 ab	36.6 ab	32.2 ab
	标准差	2.5	20.4	9.9	12.6	12.3	11.6
	变异系数(%)	137.4	531.6	454.5	371.5	308.7	360.0
全氮 (g/kg)	平均值	0.66 d	1.55 c	2.02 c	2.11 bc	2.84 ab	2.99 a
	标准差	0.32	0.66	0.76	0.42	0.76	0.82
	变异系数(%)	48.48	43.67	37.85	19.77	24.33	27.54
碱解氮 (mg/kg)	平均值	109.1 e	164.8 d	167.1 cd	261.3 c	501.5 b	631.8 a
	标准差	76.40	70.52	81.83	67.11	106.82	200.14
	变异系数(%)	70.03	42.77	48.96	25.68	21.30	31.68
全磷 (g/kg)	平均值	20.00 a	9.98 b	7.41 b	2.97 c	5.87 b	4.79 b
	标准差	9.80	5.46	2.09	0.98	2.36	1.69
	变异系数(%)	49.00	54.71	28.28	32.85	40.24	35.31
有效磷 (mg/kg)	平均值	3183.0 a	3687.7 a	1151.7 b	582.8 b	702.9 b	873.3 b
	标准差	894.0	1781.4	508.6	119.7	202.4	234.9
	变异系数(%)	28.09	48.31	44.16	20.54	28.79	26.89
摄动值		0.429	0.335	0.582	0.573	0.404	0.371

注：同行数据小写字母不同表示各个土壤参数在不同景观类型之间差异显著($P<0.05$)。

表 2 相同景观类型下不同土地利用方式或景观位置土壤养分含量变化特征
Table 2 Soil nutrient contents of the different soil use pattern and landscape position on landscape types

景观类型	土地利用方式或 所处景观位置	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	全磷 (g/kg)	有效磷 (mg/kg)	摄动值
富磷区	桉树林	10.5 ± 3.8 b	0.57 ± 0.21 b	107.3 ± 35.2 a	5.66 ± 1.97 b	1 360 ± 547 d	0.687
	旱冬瓜林	34.3 ± 14.0 ab	1.53 ± 0.61 a	215.8 ± 75.3 a	7.29 ± 2.88 b	4 381 ± 705 b	0.284
	华山松林	50.5 ± 16.6 a	1.96 ± 0.43 a	172.8 ± 50.7 a	15.3 ± 3.82 a	2 791 ± 399 c	0.153
	云南松林	46.1 ± 17.2 a	1.70 ± 0.66 a	116.1 ± 49.4 a	15.45 ± 5.53 a	6 325 ± 859 a	0.132
	针阔混交林	50.8 ± 20.4 a	1.97 ± 0.41 a	212.3 ± 83.6 a	6.23 ± 2.07 b	3 573 ± 235 bc	0.217
坡耕地	露地作物	16.3 ± 2.8 b	2.26 ± 0.19 a	131 ± 62.6 b	7.45 ± 1.49 ab	1 570 ± 424 a	0.273
	露地蔬菜	33.0 ± 9.1 a	2.58 ± 0.88 a	108.2 ± 42.8 b	5.47 ± 2.07 b	1 325 ± 147 a	0.231
	经果林	15.8 ± 3.5 b	1.22 ± 0.11 b	262.1 ± 18.4 a	9.30 ± 0.23 a	559.8 ± 17.0 b	0.345
坝平地	露地蔬菜	45.3 ± 14.8 a	1.84 ± 0.15 b	242.4 ± 11.4 b	2.56 ± 0.09 b	628.4 ± 7.9 b	0.215
	设施蔬菜	29.9 ± 8.8 a	2.65 ± 0.06 a	197.9 ± 23.1 c	4.25 ± 0.08 a	692.0 ± 11.4 a	0.162
	设施花卉	26.6 ± 6.6 a	1.84 ± 0.10 b	343.6 ± 25.5 a	2.12 ± 0.07 c	427.8 ± 8.4 c	0.328
农田沟渠	露天区沟渠	42.8 ± 13.3 a	2.64 ± 0.98 a	445 ± 120 a	3.87 ± 1.06 b	607 ± 194 a	0.228
	大棚区沟渠	30.4 ± 9.5 a	3.04 ± 0.59 a	558 ± 102 a	7.87 ± 1.90 a	798 ± 241 a	0.059
柴河河道	上游底泥	22.7 ± 4.7 b	2.85 ± 0.85 a	617 ± 209 a	4.39 ± 1.69 a	821 ± 239 a	0.177
	下游底泥	41.7 ± 6.6 a	3.12 ± 0.95 a	647 ± 236 a	5.19 ± 1.96 a	926 ± 270 a	0.000

注：小写字母不同表示各个土壤参数在相同景观类型下不同土地利用方式或所处景观位置之间差异显著($P<0.05$)。

坝平地不同土地利用方式中有机质含量以露地蔬菜最高,但与设施蔬菜与花卉的差异不显著;全氮含量设施蔬菜土壤显著高于露地蔬菜和设施花卉,碱解氮 3 种不同利用方式之间均具有显著差异;磷含量均表现为设施蔬菜土壤含量最高,设施花卉土壤最低,且 3 种土地利用方式之间均具有显著差异;摄动分析表明坝平地不同土地利用方式土壤综合肥力顺序为:设施蔬菜>露地蔬菜>设施花卉。

所处不同景观位置的沟渠土壤有机质含量以露天农田区的沟渠含量较高,但与大棚区沟渠土壤含量差异并不显著;氮磷含量都表现为大棚区沟渠土壤大于露天农田区沟渠土壤,但仅全磷含量具有显著差异。摄动分析表明沟渠土壤综合养分含量为大棚区农田沟渠>露天区农田沟渠。

柴河底泥根据其所在景观位置表现为下游底泥中所有养分含量均高于上游底泥,其中有机质含量之间具

有显著差异，而氮磷含量差异并不显著。摄动分析表明柴河底泥土壤综合养分含量为柴河下游>柴河上游。

2.3 景观类型及土地利用方式或景观位置对土壤养分的影响分析

景观类型及土地利用方式或所处景观位置对土壤养分的嵌套方差分析结果表明：景观类型及土地利用方式或所处景观位置对土壤磷含量均具有极显著

的影响，且二者之间的影响贡献基本相似；对氮素而言，景观类型对土壤氮含量的影响大于土地利用方式或景观位置；对土壤有机质而言，景观类型对土壤有机质的影响小于土地利用方式或景观位置。总体而言，除土地利用方式或景观位置对碱解氮影响不显著外，景观类型及土地利用方式或景观位置对其他养分含量均具有显著的影响(表 3)。

表 3 土壤养分的嵌套方差分析
Table 3 Nested ANOVA analysis of soil nutrient contents

土壤养分	影响因素	df	F	P
有机质	景观类型	4	3.198	0.027
	土地利用方式或景观位置	10	4.092	0.001
全氮	景观类型	4	9.450	0.000
	土地利用方式或景观位置	10	2.606	0.021
碱解氮	景观类型	4	33.562	0.000
	土地利用方式或景观位置	10	1.264	0.294
全磷	景观类型	4	14.926	0.000
	土地利用方式或景观位置	10	6.578	0.000
有效磷	景观类型	4	142.890	0.000
	土地利用方式或景观位置	10	29.483	0.000

3 讨论

土壤养分含量高低及其空间变异程度不仅可以反映土壤本身养分储量及植物可利用态量的大小，也间接反映各个景观类型及不同利用方式人为管理程度及降雨径流输送污染物强度和通量^[15-16]。根据本研究结果，富磷区林地有机质含量较高，主要由于林地存在大量凋落物积累导致有机质含量较高，而其他景观类型由于本身景观属性特征及人为干扰强度及管理措施等方面导致地表几乎无凋落物存在；磷矿区土壤磷含量高主要是受到当地土壤母质的影响，由于处于我国的三大磷矿带，土壤磷素背景值含量很高^[17]。但是由于不同群落类型及其生物学属性特征导致富磷区林地的有效磷空间变异程度较高。磷矿区由于受到人类高强度开发后，地表基本没有植被覆盖，因此有机质含量较低，其空间变异程度也最小。对氮素而言，柴河底泥的氮素含量最高，主要由于柴河汇集了流域内大量径流，随径流携带的大量土壤颗粒在径流输移过程中，慢慢沉淀最终导致河道底泥本身氮磷含量较高，因此河道底泥的疏浚被看作是减少污染物进入滇池的一个重要措施^[18]。利用摄动分析对不同景观类型土壤综合肥力进行分析表明富磷区林地肥力最好，可能原因不仅是本身土壤磷素含量高，另外由于植被的作用，其有机质及氮素积累程度

也较高，使得富磷区林地综合肥力较好。坝平地与坡耕地综合肥力相对较差的主要原因在于受到人为影响程度较强，高强度的人为管理措施，使得土壤质量下降，养分容易流失^[19]。从所研究的 6 种景观来看，富磷区由于较高的磷素背景值，加上较高的坡度，因此富磷山区的植被保护及抚育、恢复是面源污染控制的主要措施^[17,20]，对于坡耕地、坝平地而言，尽管二者综合土壤养分含量并不高，坡度也较小，但受人为干扰及降雨的影响较大，加上土壤质量下降其养分固持能力不高，可能导致大量养分的流失，因此可能成为非点源的主要潜在性污染源，应重点给予重视^[19]。磷矿区综合养分居中，主要是磷素含量高而氮素缺乏，虽综合养分不高，但其磷素含量却极高，较少的水土流失即可导致径流中磷素含量较高，因此有效地控制磷矿区的水土流失，是有效控制面源磷输移的主要环节之一^[17,20]。

在相同景观类型下，不同土地利用方式或景观位置对土壤氮磷含量存在较大的影响。其中富磷区内磷素、坡耕地及坝平地的氮磷含量均表现出较明显的差异，说明相同景观区域斑块内，不同土地利用方式或景观位置极大地改变了土壤氮磷养分库的含量，主要原因可能有两个方面：一是自然条件下植被群落结构的复杂程度，二是土地人为的种植模式及管理方式。植物群落结构在富磷区对土壤氮磷有显著的影响，而

人类管理耕作措施(如水肥施用等)在坡耕地及坝平地的影响较强^[17,21-23]。摄动分析结果表明富磷区的云南松林、坡耕地中的露天蔬菜、坝平地中的设施蔬菜、大棚区的农田沟渠及柴河下游的底泥综合养分最高,说明这几种土地利用类型及流域内某些空间位置的面源污染输移应是该流域面源污染防控需要重点关注的。但是需要说明的是,土壤养分含量的高低是多个因素共同作用影响的过程,氮磷含量的空间变异还取决于土壤本身的类型、物理性质及人为干扰及水肥管理措施等等。

嵌套方差分析表明景观类型及土地利用方式或所处景观位置均对土壤有机质及氮磷含量具有显著的影响,这说明柴河流域内不同景观类型和土地利用方式或所处流域内的空间位置共同决定了土壤氮磷含量的变异程度。因此,在流域尺度上探讨面源污染输移风险时,单独通过景观类型或土地利用类型分析或模拟会降低评估的准确性,根据嵌套分析结果建议结合景观类型及土地利用类型进行分析以提高在面源污染输移风险评估及防控中的精确性,并在此基础上探讨主要防控环节及主要影响因素^[24-25]。

4 结论

1) 柴河流域内磷素主要以磷矿区及富磷区林地含量较高,而氮素则主要以沟渠土壤和柴河河道底泥的含量较高;富磷区林地的磷素及磷矿区的氮素具有较高的空间变异。

2) 相同景观类型下不同土地利用方式或景观位置对土壤氮磷含量存在较高的影响,其中富磷区内磷素、坡耕地及坝平地的氮磷均表现出显著差异。

3) 柴河流域内富磷区的云南松林、坡耕地中的露天蔬菜种植区及坝平地中的设施蔬菜种植区土壤与大棚区的农田沟渠及柴河下游的底泥综合养分最高,其面源污染输移风险较高。

4) 景观类型及土地利用方式或所处景观位置均对土壤养分含量具有显著影响,因此建议在面源污染输移风险评估及防控时应同时结合景观类型及土地利用类型、流域内所处的空间位置进行分析。

另外,由于本研究只对土壤养分进行了测定分析,但面源污染输出不仅受到土壤源强的影响,另外还受到降雨、地形、下垫面属性、人为管理方式等因素的影响,因此需要结合降雨对面源污染输移进行监测分析,才能更准确地对柴河流域内的面源污染进行评估,并指导流域内面源污染的防控及管理。

参考文献:

- [1] 金相灿. 湖泊富营养化控制和管理技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 53-54
- [2] 全为民, 严力蛟. 农业面源污染对水体富营养化的影响及其防治措施[J]. 生态学报, 2002, 22(3): 291-299
- [3] 曹晓峰, 孙金华, 黄艺. 滇池流域土地利用景观空间格局对水质的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(2): 364-369
- [4] Zaman M, Di H J, Cameron K C, et al. Gross nitrogen mineralization and nitrification rates and their relationships to enzyme activities and the soil microbial biomass in soils treated with dairy shed effluent and ammonium fertilizer at different water potentials[J]. Biology and Fertility of Soils, 1999, 29: 178-186
- [5] Van Gestel M, Ladd J N, Amato M. Microbial biomass responses to seasonal change and imposed drying regimes at increasing depths of undisturbed topsoil profiles[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1992, 24: 103-111
- [6] 唐艳凌, 章光新. 流域单元景观格局与农业非点源污染的关系[J]. 生态学杂志, 2009, 28(4): 740-746
- [7] 谭德水, 江丽华, 谭淑樱, 等. 湖区小麦-玉米轮作模式下不同施肥措施调控氮磷养分流失研究[J]. 土壤学报, 2015, 52(1): 128-137
- [8] Gucker B, Boechat I G, Giani A. Impacts of agricultural land use on ecosystem structure and whole-stream metabolism of tropical Cerrado streams[J]. Freshwater Biology, 2009, 54(10): 2 069-2 085
- [9] 胡慧蓉, 胡庭兴, 谭九龙, 等. 华西雨屏区不同植被类型对土壤氮磷钾及有机碳含量的影响[J]. 土壤, 2014, 46(4): 630-637
- [10] 毛战坡, 尹澄清, 单宝庆, 等. 农业非点源污染物在水塘景观系统中的空间变异性研究[J]. 水利学报, 2006, 37(6): 727-733
- [11] 胡斌, 和树庄, 陈春瑜, 等. 滇池流域土壤氮磷分布特征及关键影响因素研究[J]. 土壤学报, 2012, 49(6): 1 178-1 184
- [12] 王振平, 余辉, 汪怀建, 等. 大港河小流域土地利用方式对土壤肥力影响的研究[J]. 江西农业大学学报, 2011, 33(5): 1 017-1 022
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
- [14] 何湘藩, 刘文奇. 关于系统的摄动与方案的评价[J]. 云南大学学报(自然科学版), 1989, 11(3): 193-199
- [15] 陈利顶, 丘君, 张淑荣, 等. 复杂景观中营养型非点源污染物时空变异特征分析[J]. 环境科学, 2003, 24(3): 85-90
- [16] Burwell R E, Timmons D R, Holt R F. Nutrient transport in surface as influenced by soil cover and seasonal periods[J]. Soil Science Society of America Journal, 1975, 39: 523-528
- [17] 付登高, 吴晓妮, 何锋, 等. 柴河流域不同景观类型径流氮磷含量及其计量比变化特征[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(5): 671-676
- [18] 余晓飞. 主要入滇池城市河道污染物沉降特性与颗粒粒径分布特征研究[D]. 昆明: 云南大学, 2013

- [19] 杨振兴, 张乃明, 王磊, 等. 滇池宝象河流域土壤磷素变异特征及影响因素研究[J]. 土壤, 2011, 43(1): 39–43
- [20] 付登高, 何锋, 郭震, 等. 滇池流域富磷区退化山地马桑-蔗茅植物群落的生态修复效能评价[J]. 植物生态学报, 2013, 37(4): 326–334
- [21] Vanni M J, Renwick W H, Bowling A M, et al. Nutrient stoichiometry of linked catchment-lake systems along a gradient of land use[J]. *Freshwater Biology*, 2011, 56: 791–811
- [22] 曾伟斌, 邓琦, 张全发, 等. 丹江口库区不同土地利用土壤碳氮含量的变化[J]. 土壤, 2013, 45(3): 385–391
- [23] 王敬, 程谊, 蔡祖聪, 等. 长期施肥对农田土壤氮素关键转化过程的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(2): 292–304
- [24] 杨树华, 杨桂华. 滇池流域土地利用结构及其生态评价的初步研究[J]. 云南大学学报(自然科学版), 1992, 14(2): 202–219
- [25] 王鹏举. 基于土地利用结构与景观格局的小流域氮、磷、碳输出特征分析[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012

Spatial Variability of Soil Nitrogen and Phosphorus in the Typical Landscape Units in Chaihe Catchment

WU Xiaoni^{1, 3}, FU Denggao^{2*}, LIU Xingzhu^{1, 3}, ZONG Dezhi¹, LIU Yongquan¹

(1 *Key Laboratory of Special Biological Resource Development and Utilization of Universities in Yunnan Province, Kunming 650214, China*; 2 *Institute of Environmental Sciences and Ecological Restoration, Yunnan University, Kunming 650091, China*; 3 *Kunming Key Laboratory of Hydroecology Restoration of Dianchi Lake, Kunming 650214, China*)

Abstract: In order to understand spatial variability characteristics of soil nitrogen and phosphorus contents in the typical landscape units in Chaihe catchment, 72 surface soil samples were collected from the lands different in landscape and land-use types in Chaihe catchment. The contents of nitrogen, phosphorus, and organic matter of the soils were analyzed. Results showed that the soils in phosphorus mining area and forests of phosphorus-enriched area contained the higher phosphorus. The average contents of total phosphorus and available phosphorus were 20 g/kg and 3 687.7 mg/kg, respectively. The soils in sediments of ditches and Chaihe River contained the higher nitrogen. The average contents of total nitrogen and available nitrogen reached 2.99 g/kg and 631.8 mg/kg, respectively. The great variation of the contents of soil nitrogen and phosphorus were found in different land-use types in phosphorus mining area, slope farmland, and flatland. The results of nested ANOVA analysis of soil nutrient contents suggested that landscape, land-use and land spatial location co-determine the variability of soil nitrogen, phosphorus and organic matter contents in the catchment. It is, therefore, necessary to combine landscape with land-use and land spatial location together in risk assessment and control of non-point source pollution in Chaihe catchment.

Key words: Chaihe catchment; Landscape unit; Land-use type; Soil nutrient content