

滇池大河流域农田土壤磷素空间变异特征及对地表径流的影响*

文波龙^{1,2} 刘兴土¹ 张乃明^{3†}

(1 中国科学院湿地生态与环境重点实验室, 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(3 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201)

SPATIAL VARIATION OF SOIL PHOSPHORUS IN FARMLAND AND ITS EFFECT ON SURFACE RUNOFF POLLUTION LOAD IN THE DAQINGHE WATERSHED OF DIANCHI LAKE

Wen Bolong^{1,2} Liu Xingtu¹ Zhang Naiming^{3†}

(1 Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China)

(2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 College of Resources and Environmental Science, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

关键词 滇池; 大清河; 土壤磷; 水环境

中图分类号 X142; X524

文献标识码 A

滇池水体的严重富营养化已引起学术界和社会的广泛关注, 围绕滇池富营养化成因和防治措施已有较多研究成果^[1-5]。滇池沿岸具有其特殊的地理特点, 滇池周边是山地、台地与湖滨地带的有机结合^[6], 湖滨带是湖泊水生生态系统与湖泊流域陆地生态系统间一种非常重要的生态过渡带, 滇池湖滨带开发强度大, 农田复种指数高, 养分随径流进入滇池的过程短, 潜在流失风险大, 农业非点源污染是滇池水体富营养化的重要因素之一^[7-8]。磷的流失与土壤磷素的累积状况和降雨关系密切^[9-13], 了解和掌握湖滨区径流携带磷素入湖的输移特征, 不仅是滇池富营养化和流域模型研究的基础, 而且也是入湖污染治理工程设计的重要依据^[14]。本研究通过对滇池湖滨区典型入湖河流大河流域沿湖区域实地采样分析, 对该区域土壤磷累积、空间

变异特征及对地表径流水环境的影响进行研究, 以为滇池流域非点源污染治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

滇池流域为中亚热带湿润季风气候, 多年平均降雨量为 1 000 mm 左右, 降水近 80% 集中在 5 ~ 10 月。研究区域为湖滨区大清河沿岸, 位于滇池北岸, 昆明市广福路以南, 具体的边界范围北起张家庙昆明第二污水处理厂, 南至大清河入湖口, 西起盘龙江东岸, 东至海河西岸, 区域总面积 3 km²。研究区总的地形北高南低、南北长约 6 km, 东西宽约 0.5 km, 地貌为湖积平原。研究区总耕地面积约 140 hm², 占 47%, 种植结构单一, 农业生产以设施

* 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2005AA60101002)、国家自然科学基金项目 (40761014) 和云南省自然科学基金重点项目 (2009CC006) 资助

† 通讯作者, E-mail: zhangnaiming@sina.com

作者简介: 文波龙 (1982—), 男, 山西平陆人, 博士研究生, 主要研究方向为农业非点源污染输出机制与防控、湿地生态与环境。E-mail: wenbolong@163.com

收稿日期: 2010-09-27; 收到修改稿日期: 2010-11-24

集约化种植为主,95%左右的农田用于韭菜(韭黄)种植,个别种植花卉的田块零星分布其中,整个区域施肥、灌溉等管理措施基本属于同一模式。部分生活污水会通过田间支渠(不进入毛渠、农渠、斗渠)直接排入干渠,多数生活污水则经污水系统排入大清河^[15]。大清河作为滇池的主要入湖河流之一,水体污染较为严重,入湖污染负荷较大。

1.2 样品采集与分析

依据大清河流域农田水渠连通的分布格局将研究区域划分为3个片区进行调查研究(图1),片区间沟渠系统互不相通,片区内的毛渠、农渠、斗渠和支渠完善、相连。按照地统计学分析要求,采用网格法进行布点采样,分别在第一片区采29个样,第二片区采32个样,第三片区采9个样,总共70个土样,各样点间隔为100m,采样点位如图1所示。每个采样点采取混合土样,方法为在以网格点为圆心10m为半径的范围内采集5钻0~20cm的表层

土壤组成代表该点的混合样本。

在各片区内斗渠进入支渠前的汇水点采集水样,共9个水样点,分别于5月、7月、9月、11月共4次采集水样,采样时间为单次降雨(之前至少5d内无降雨)后1h内完成采样,采样点固定。

土壤全磷测定采用 $\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ 消煮-钼锑抗比色法、土壤有效磷采用 $0.5\text{ mol L}^{-1}\text{ NaHCO}_3$ 浸提-钼锑抗比色法^[16],土壤水溶性磷用水土比60:1浸提60min后钼蓝比色法测定^[17]。水样总磷测定采用过硫酸钾氧化-钼蓝比色法^[18]。

1.3 数据处理方法

常规数据统计分析采用 SPSS11.5 软件完成,地统计分析采用 GS + 7.0 软件拟合半变异函数建立拟合模型及其参数。在 ArcGIS 9.2 中应用 Geostatistical Analyst 模块,并采用普通 Kriging 方法,输入拟合参数,建立研究区土壤磷素空间分布图。

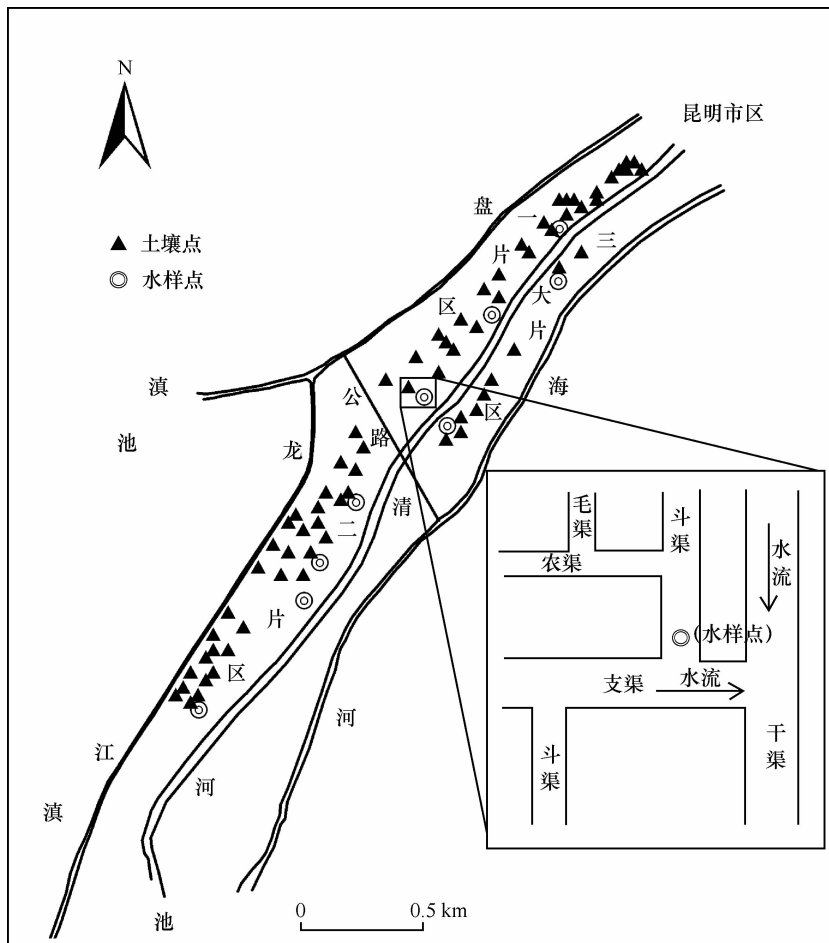


图1 土样、沟渠水样采样位点图

2 结果与讨论

2.1 土壤及地表水磷含量统计特征

经典统计学分析表明(表 1),滇池湖滨大清河流域土壤中的全磷含量范围为 $0.73 \sim 1.70 \text{ g kg}^{-1}$, 平均值为 1.14 g kg^{-1} ; 土壤中有有效磷含量 $8.96 \sim 124.4 \text{ mg kg}^{-1}$, 平均值为 32.95 mg kg^{-1} , 研究区土壤全磷与第二次全国土壤普查土壤全磷含量主体范围 $0.44 \sim 0.85 \text{ g kg}^{-1}$ 相比处于较高水平^[19], 土壤

有效磷含量高^[16,20], 在这样磷素丰富的土壤上集约化种植, 持续高强度的肥料投入将会增加磷素流失潜在风险。土壤有效磷和水溶性磷含量较土壤全磷含量变异大的多。该区域 5 月农田沟渠水中的磷素水平, 能够最好地体现区域非雨季内土壤磷素的累积对排水磷污染负荷的影响, 5 月农田排水水中的总磷含量 $0.10 \sim 0.26 \text{ mg L}^{-1}$, 平均值为 0.21 mg L^{-1} , 高于我国 V 类地表水环境质量的标准(湖、库 0.2 mg L^{-1})^[21], 对滇池水体有较高磷素输入风险。

表 1 研究区磷素累积水平描述性统计特征及正态分布检验

	土壤全磷 (g kg^{-1})	土壤有效磷 (mg kg^{-1})	土壤有效磷 对数转化	土壤水溶性磷 (mg kg^{-1})	土壤水溶性磷 对数转化	农田排水总磷 (mg L^{-1})
最小值	0.73	8.96	0.95	3.89	0.59	0.1
最大值	1.7	124.4	2.09	64.81	1.81	0.26
平均值	1.14	32.95	1.45	15.34	1.12	0.21
标准差	0.19	23.39	0.23	10.24	0.22	0.05
变异系数	0.17	0.71	0.16	0.67	0.2	0.24
偏度	0.71	2.63	0.81	2.87	0.73	
峰度	1.03	7.47	1.2	9.61	1.73	
P_{k-s}	0.28	0.003	0.344	0	0.138	

单样本柯尔莫哥洛夫-斯米诺夫(K-S)检验($p < 0.05$, 2-tailed)表明, 土壤全磷符合正态分布, 而土壤有效磷和水溶性磷不符合正态分布, 经对数转换后土壤有效磷、水溶性磷的数据符合正态分布(表 1), 用对数转化后的数据进行 Kriging 插值分析。

2.2 土壤磷素的空间分布特征

土壤磷素分布是由结构性和随机性因素共同作用的结果, 表 2 中, C_0 表示块金值, 代表由实验误差和小于实验取样尺度上施肥、灌溉等随机因素引起的变异; C 为偏基台值, 代表由气候、土壤母质、地

形等非人为的区域因素(空间自相关部分)引起的变异。总体来看, 研究区土壤磷素与实验变异函数拟合较好(决定系数 R^2 均在 0.7 以上)。块金值和基台值之比 [$C_0/(C + C_0)$], 即块金效应, 可用来表明系统变量的空间相关性的程度。块金效应小于 0.25, 空间相关性强; 在 0.25 ~ 0.75 之间, 空间相关性中等; >0.75 , 空间相关性弱^[22]。表 2 可以看出, 土壤全磷、有效磷的块金效应分别为 0.09 和 0.00, 具有很强空间相关性, 结构性因素(自然因素)的影响较大, 但水溶性磷的块金效应达到 0.41, 属中等空间自相关, 受耕作等人为因素影响的程度大。

表 2 土壤磷素空间变异半方差函数模型及其参数

指标	趋势效应	模型	块金值 C_0	偏基台值 C	块金效应 $C_0/(C + C_0)$	变程 (m)	决定系数 R^2	残差 RSS
土壤全磷	无	指数	0.002	0.022	0.09	195.0	0.771	0.000 1
土壤有效磷	无	球型	0.000	0.027	0.00	101.0	0.770	0.000 2
土壤水溶性磷	无	球型	0.015	0.021	0.41	319.0	0.807	0.000 5

土壤磷素的空间分布格局(图 2)进一步表明土壤表层磷素分布具有明显的空间特征,从整个区域尺度看,近城区土壤全磷、有效磷、水溶性磷总体上均高于近湖区,从西北向西南逐渐递减的趋势,可能是因为调查研究的区域均是围湖造田的农田,在靠近昆明城区的土壤较早的被作为农田,施肥耕作历史较长,加之各种含磷灌溉水长期不同方式的引入等,磷素累积的量相比近湖区而言较大。但总体而言,各片区土壤全磷、有效磷、水溶性磷含量的差异未达显著水平(表 3),说明该区域各片区间农田磷素输入或者农业管理模式上还处于同一强度水平。

土壤磷素的组成分析表明土壤有效磷/全磷、

水溶性磷/有效磷在不同片区间十分接近(表 3),说明该区域不同片区土壤磷素肥力的供应强度基本一致。但有效磷/全磷变化在 2%~3%,说明虽然该种植区土壤中全磷累积量高,库容大,但能被当季作物所吸收的有效态磷较少,所以如果能够通过农业改良措施使得这部分被固定在土壤中的磷库适时活化出来,就可以既减少肥料投入又减少水土流失带走的固定态磷素,进而减少对水环境的影响。水溶性磷/有效磷变化在 45%~67%,说明该区域土壤速效态磷中水溶形态占 1/2 左右,这要求在耕作过程中,要尽力有效防止和控制这部分水溶性磷直接随地表径流或向下淋溶污染地表水体和地下水。

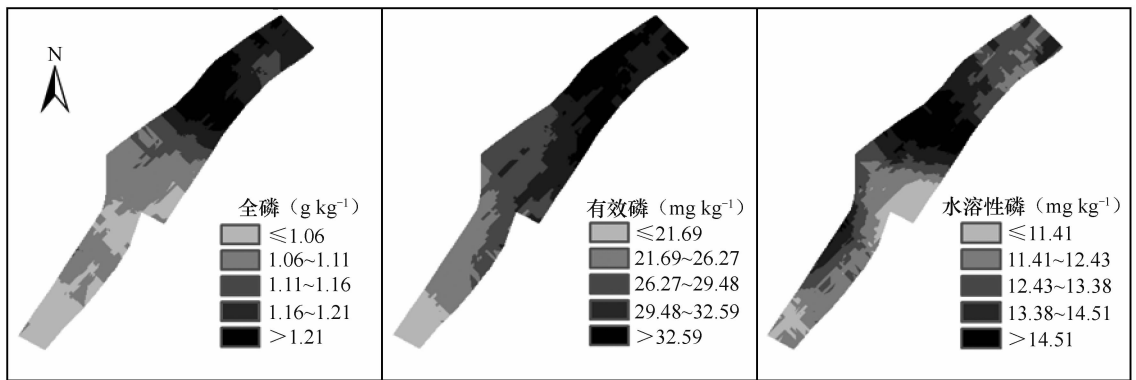


图 2 土壤磷素的空间变异

表 3 不同片区土壤全磷、有效磷、水溶性磷的累积规律

片区	样本数 <i>n</i>	全磷 (g kg ⁻¹)	有效磷 (mg kg ⁻¹)	水溶性磷 (mg kg ⁻¹)	有效磷/全磷 (%)	水溶性磷/有效磷 (%)
第一片区	29	1.19 ± 0.16 a	36.5 ± 14.4 a	15.4 ± 5.1 a	2.8	45.1
第二片区	32	1.10 ± 0.21 a	29.8 ± 13.1 a	14.2 ± 6.0 a	2.8	46.4
第三片区	9	1.09 ± 0.15 a	32.2 ± 15.6 a	19.6 ± 8.5 a	3.1	67.2

注:数据为平均值 ± 标准差,同一列数据后相同的小写字母表示在不同片区间磷素含量未达到 $p < 0.05$ 水平上的显著性差异

滇池湖滨大清河流域农田土壤中全磷含量与有效磷含量之间、水溶性磷与有效磷之间均呈显著正线性相关(表 4),说明该研究区菜地土壤中磷素

不同形态间转换率稳定,土壤磷素释放也将稳定持续,该区域农田排水存在一个能够持续、稳定贡献磷素的潜在“污染源”。

表 4 土壤不同磷素形态的相关性分析

因变量 <i>y</i>	自变量 <i>x</i>	线性回归方程	相关系数 <i>r</i>
有效磷	全磷	$y = 0.0854x - 64.07$	0.69 *
水溶性磷	有效磷	$y = 0.3346x + 4.31$	0.76 *

注: $n = 70$, *, $p < 0.05$

2.3 农田排水中磷素的时空分布特征

2.3.1 农田排水的磷素空间变异特征 5月至9月研究区农田排水表现出近城区(第一片区和第三片区)水样的总磷含量较近湖区(第二片区)高(图

3),这与整个区域土壤磷素累积的空间分布特征相一致,可能农田沟渠水受到农田土壤养分流失的影响所致,11月份各片区受引水灌溉、排水网分隔等农业耕作措施的影响,沟渠水总磷含量变异特殊。

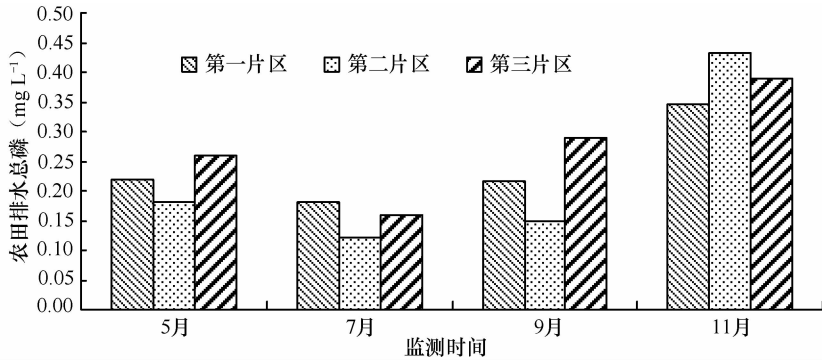


图3 农田排水的磷素空间分布特征

2.3.2 农田排水的磷素时间变异特征 从5月至7月农田排水总磷的含量下降,7月至9月水中的总磷含量又有所增加,11月水中的总磷含量剧增(图4)。研究区所属的滇池流域每年11月至4月气候温暖干燥,而5月至10月受西南季风影响进入雨季,降雨较为集中,占全年降雨量的80%,降雨量在这段时间内基本成正态分布,最大降雨量在7、8月份。4月底5月初是雨季初期,地表径流溶解、搬运非雨季土壤中所吸附和累积的磷素,沟渠水磷素污染负荷较大;随着雨季的推移,农田排水逐渐得到稀释,污染负荷降低;7、8月份土壤磷素流失主要为暴雨携带的土壤颗粒中所携带的磷素,结合雨热同季的优势,当地种植基本进入第二茬,土壤追肥和降雨量的逐渐稳定使得9月的排水负荷均有所增加;进入11月,雨季基本结束,降雨量急剧减少,当地集中抽引盘龙江的水进行灌溉,并堵截排水网,

农田沟渠灌溉水反复循环利用,使得农田排水污染负荷进一步增加。

2.4 土壤磷素累积与农田排水污染负荷关系

5月、7月和9月各片区农田沟渠水中磷素含量变化趋势均与土壤有效磷趋势一致(图5),说明农田排水中磷素污染负荷受到土壤中速效态磷素的较大影响,曹雪艳等^[23]用原位模拟降雨法研究了滇池流域农田地表径流中磷素的动态变化规律,研究表明滇池流域土壤表面易形成地表径流,初始产流时间短,径流是磷素流失的主要途径,土壤有效磷含量与径流总磷和水溶性总磷间均存在显著的相关性。还有研究表明,在一定程度上可用土壤有效磷来预测土壤磷流失对地表水质的潜在影响^[24]。11月,雨季基本结束,受引水灌溉水源和当时施肥等农业耕作措施的共同影响,地表水磷素污染负荷变化趋势规律不同于其他月份。

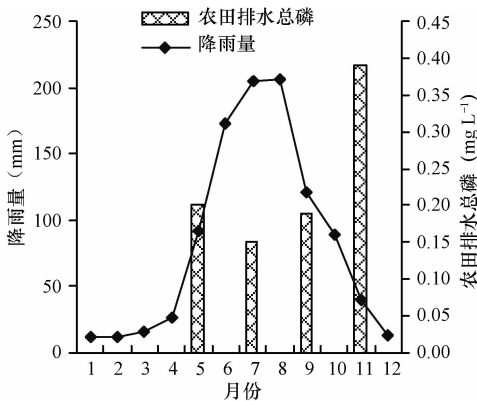


图4 农田排水的磷素随时间变化特征

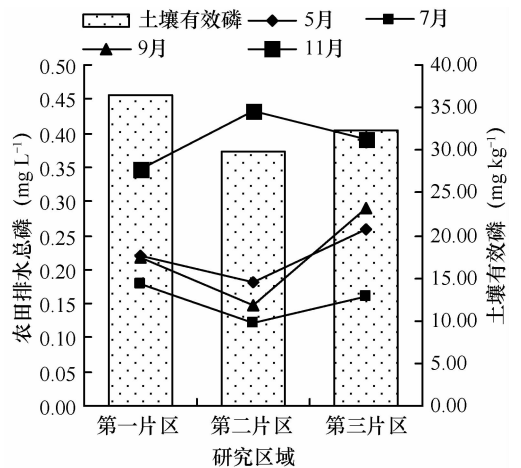


图5 土壤有效磷累积与农田排水总磷的相互关系

3 结 论

滇池大河流域农业种植区磷素污染负荷较高,土壤全磷平均 1.14 g kg^{-1} ,与第二次全国土壤普查土壤全磷含量相比处于较高水平,有效磷 32.95 mg kg^{-1} ,含量高,流域内农田土壤全磷、有效磷具有很强空间自相关格局,但水溶性磷受田间管理等随机因素影响大,空间自相关性差,空间异质性大。总体上近城区土壤中的全磷、有效磷含量及农田排水磷素含量均高于近湖区的。雨季初期农田排水总磷平均为 0.21 mg kg^{-1} ,高于我国 V 类地表水(湖、库)的标准,在土壤肥力、施肥、降雨和灌溉等综合因素的影响下,农田排水中总磷含量从 5 月至 7 月下降,7 月至 11 月又呈增高趋势。流域内农田土壤磷素营养丰富,农田排水污染负荷大,且农田排水的磷素污染负荷受农田土壤有效磷含量的影响较大。因此,滇池湖滨集约化种植区磷素非点源污染防治过程中应考虑在非雨季活化利用农田土壤中固定态磷,在雨季加强农田土壤有效磷尤其是水溶性磷流失的过程消减。

参 考 文 献

- [1] 栢元蒙. 滇池富营养化现状、趋势及其综合防治对策. 云南环境科学, 2002, 21(1): 35—38
- [2] Chang F Y, Pan X J, Li Y H, et al. Contamination assessment and potential mobility of sediment phosphorus from Dianchi Lake, China. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2010, 19(1): 42—49
- [3] Liu Z H, Liu X H, He B, et al. Spatio-temporal change of water chemical elements in lake Dianchi, China. *Water and Environment Journal*, 2009, 23(3): 235—244
- [4] 段志勇, 施汉昌, 黄霞, 等. 人工湿地控制滇池面源水污染适用性研究. 环境工程, 2002, 20(6): 64—66
- [5] 金相灿, 荆一风, 刘文生, 等. 湖泊污染底泥疏浚工程技术——滇池草海底泥疏挖及处置. 环境科学研究, 1999, 12(5): 9—12
- [6] 张宇. 滇池沿岸台地水土、氮磷流失特征与控制对策分析. 云南环境科学, 2006, 25(1): 31—34
- [7] 郭怀成, 孙延枫. 滇池水体富营养化特征分析及控制对策探讨. 地理科学进展, 2002, 21(5): 500—506
- [8] 全为民, 严力蛟. 农业面源污染对水体富营养化的影响及防治措施. 生态学报, 2002, 22(3): 291—299
- [9] 李可芳, 黄霞. 磷肥的使用与农业面源污染. 环境科学与技术, 2004, 27(增): 189—190
- [10] 张乃明, 余扬, 洪波, 等. 滇池流域农田土壤径流磷污染负荷影响因素. 环境科学, 2003, 24(3): 155—157
- [11] Ulen B, Aronsson H, Bechmann M, et al. Soil tillage methods to control phosphorus loss and potential side-effects: A scandinavian review. *Soil Use and Management*, 2010, 26(2): 94—107
- [12] 晏维金, 尹澄清, 孙濮, 等. 磷氮在水田湿地中的迁移转化及径流流失过程. 应用生态学报, 1999, 10(3): 312—316
- [13] 刘方, 黄昌勇, 何腾兵, 等. 长期施肥下黄壤旱地磷对水环境的影响及其风险评价. 土壤学报, 2003, 40(6): 838—844
- [14] 刘忠翰, 贺彬, 王宜明, 等. 滇池不同流域类型降雨径流对河流氮磷入湖总量的影响. 地理研究, 2004, 23(5): 592—604
- [15] 袁晓燕, 余志敏, 施卫明. 大河流域典型村镇生活污水排放规律和污染负荷研究. 农业环境科学学报, 2010, 29(8): 1 547—1 557
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析. 第 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 70—98
- [17] 李阳红, 张乃明. 土壤磷流失风险的水溶性磷测定方法初探. 云南农业大学学报, 2007, 22(5): 710—713
- [18] 国家环境保护总局. 水与废水监测分析方法. 第 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 243—248
- [19] 全国土壤普查办公室. 中国土壤. 北京: 中国农业出版社, 1998: 901—918
- [20] 王艳玲, 何园球, 吴洪生, 等. 长期施肥下红壤磷素积累的环境风险分析. 土壤学报, 2010, 47(5): 880—887
- [21] 国家环境保护总局. GB 3838—2002 地表水环境质量标准, 2002
- [22] Sauer T J, Meek D W. Spatial variation of plant-available phosphorus in pastures with contrasting management. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 67: 826—836
- [23] 曹雪艳, 李永梅, 张怀志, 等. 滇池流域原位模拟降雨条件下不同土壤质地磷素流失差异研究. 水土保持学报, 2010, 24(3): 14—18
- [24] 倪九派, 魏朝富, 谢德体, 等. 三峡库区坡耕地土壤养分流失的实验研究. 水土保持学报, 2008, 22(5): 38—42