

DOI: 10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2016.01.004

丹江鸚鵡沟小流域土壤全磷空间分布及流失特征

张铁钢¹, 李占斌^{1,2}, 刘晓君², 李 鹏¹, 徐国策¹, 成玉婷¹

(1. 西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 陕西 西安 710048;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 磷是植物生长和水体富营养化的主要限制因子。本文选取南水北调中线工程丹江水源区的鸚鵡沟小流域作为研究区域, 通过采集土壤样品和监测不同土地利用类型的土壤磷素流失状况, 采用经典统计学与地统计学相结合的方法, 研究了流域土壤全磷的空间异质性, 结合不同土地利用方式下的土壤全磷含量与流失浓度分析其流失特征。结果表明: 鸚鵡沟流域土壤深度 0~10 cm (A_1)、10~20 cm (A_2)、20~40 cm (A_3) 和 40~60 cm (A_4) 的全磷含量平均值分别为 0.54 g/kg、0.49 g/kg、0.48 g/kg 和 0.51 g/kg, 经 ANOVA 检验, 不同深度的土壤全磷含量存在显著性差异 ($P < 0.05$); Kriging 插值表明流域土壤全磷的空间分布呈现斑块状特征, 其分布斑块随土壤深度增加逐渐由大变小。不同土地利用方式下园地、草地与耕地的土壤全磷含量存在显著性差异 ($P < 0.05$); 耕地中花生、玉米、萝卜、豆角、辣椒的总磷流失浓度均高于草地, 而草地的速效磷流失浓度高于玉米、豆角和花生。

关键词: 鸚鵡沟流域; 土壤全磷; 空间分布; 养分流失

中图分类号: S178.56

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2016)01-0018-05

The spatial distribution and loss of soil total phosphorus in Yingwugou Watershed of Danjiang River

ZHANG Tiegang¹, LI Zhanbin^{1,2}, LIU Xiaojun², LI Peng¹, XU Guoce¹, CHENG Yuting¹

(1. State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry-land Farming on the Loess Plateau,

Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

Abstract: Phosphorus is the major limiting element for plant growth and water body eutrophication. This paper selects Yingwugou Watershed in the Danjiang water resource area of the middle route engineering of South-to-North water diversion project served as the research region. Soil samples are collected and soil phosphorus loss conditions in different types of land use are monitored. The classical statistics combined with the geostatistics can be used to study the spatial heterogeneity of soil total phosphorus (STP) in the whole watershed, and the nutrient loss behaviors are analyzed in combination of STP contents with loss concentration under the different types of land use. The research results indicate that the average value of STP contents in 0~10 cm (A_1), 10~20 cm (A_2), 20~40 cm (A_3) and 40~60 cm (A_4) in Yingwugou Watershed are 0.54 g/kg, 0.49 g/kg, 0.48 g/kg and 0.51 g/kg, respectively. ANOVA tests indicate that STP content of different depth are significant ($P < 0.05$). Kriging interpolation value shows that STP spatial distribution in the whole watershed appears to be patchy, and STP distribution patch area become from big to small with an increase in soil depth gradually. There exists the significant difference ($P < 0.05$) under the different types of land uses such as tea grove land, grassland and

收稿日期: 2015-09-05

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(41330858); 国家自然科学基金资助项目(41471226, 41271290); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2014JM2-4036); 丹汉江水源区清洁小流域建设关键技术资助项目(2015slkj-06)

作者简介: 张铁钢, 男, 博士生, 研究方向为土壤侵蚀与非点源污染。E-mail: zhang_tiegang@163.com

通讯作者: 李占斌, 男, 教授, 博导, 博士, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail: zhanbinli@126.com

cultivates land. Among the cultivated land, total phosphorus loss concentration in peanut land, maize land, turnip land, bean land and pepper land is higher than that in grassland, but available phosphorus loss concentration in grassland is higher than that in maize, bean and peanut lands.

Key words: Yingwugou Watershed; soil total phosphorus; spatial distribution; nutrient loss

磷是地球生命系统的主要营养元素之一,也是生态系统常见的营养限制因子^[1],磷素含量的变化影响着包括碳、氮循环在内的其他元素的生物地球化学循环^[2]。土壤中的磷素主要以溶解态磷和颗粒态磷两种形式随径流迁移进入水体,施肥过量或土壤侵蚀会导致水质下降甚至水体富营养化^[3-5]。据估计,全世界每年有 $3 \times 10^6 \sim 4.3 \times 10^6$ t 的磷素从土壤迁移到水中^[6],磷素在水体富营养化过程中有着至关重要的作用^[7-8],因此研究土壤磷素的空间分布及其流失特征显得尤为重要。土壤磷元素的空间分布除了受成土母质影响以外^[9],还与土地利用方式及植被类型^[10-11]、耕作措施^[12]等密切相关。本文选取南水北调中线工程丹江水源区的鹦鹉沟小流域,分析其流域尺度土壤磷素的空间异质性和不同土地利用方式下土壤全磷的含量及其流失浓度,探讨不同土地利用方式下磷素的空间分布与流失特征,为南水北调工程中线水源区流域的水土流失治理和非点源污染防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

鹦鹉沟流域位于商南县城东南 2 km 处的城关镇五里铺村,地理位置介于东经 $110^\circ 52' 16'' \sim 110^\circ 55' 30''$ 、北纬 $33^\circ 29' 55'' \sim 33^\circ 33' 50''$ 之间。流域总面积 1.87 km²。以低山丘陵地貌为主,河谷开阔,最高海拔 600 m,最低海拔 464 m。属于北亚热带和暖温带过渡区,具有气候温和、日照充足、雨量充沛、四季分明的特点。降水年内分配不均,主要集中在 7~9 月,约占年降水量的 50%,且多以暴雨形式出现,流域内土壤母岩主要为花岗岩、片麻岩、石灰岩等。土壤以黄棕壤、风化沙壤土为主,土壤质地按美国制分类法为砂质壤土和粉土,土壤有机碳的平均含量为 16.7 g/kg。农地、林地、草地的土壤容重分别为 1.29 g/cm³、1.40 g/cm³ 和 1.54 g/cm³。

1.2 土壤样品采集

根据流域的土地利用图和数字高程图,如图 1 所示,共设置 78 个采样点。每个样点分为四层,以 0~10 cm (A₁)、10~20 cm (A₂)、20~40 cm (A₃) 和 40~60 cm (A₄) 的土壤深度采集样品,共采集土壤样品 312 个。采样点坐标通过高精度 GPS 定位,采样过程中详细记录采样点的土地利用类型、海拔、

坡度、坡向等样点信息。采样时间为 2010 年 10 月,采样后将土壤样品带回实验室进行风干、研磨、过筛备用。土壤全磷(STP)含量采用 HClO₄-H₂SO₄ 消煮钼锑抗比色法测定,速效磷(AP)含量采用 NaHCO₃ 浸提钼蓝比色法测定^[13]。

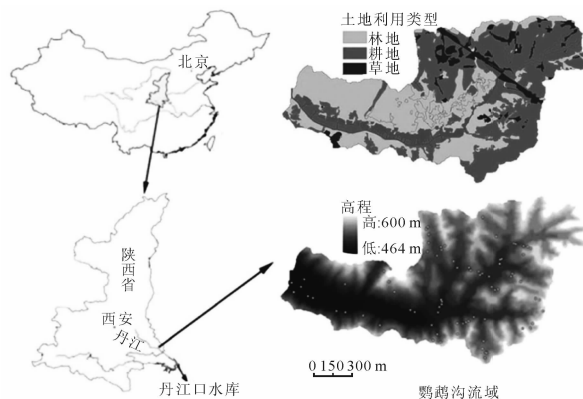


图 1 鹦鹉沟土地利用类型和采样点分布
Fig. 1 Land use types and soil sample sites of Yingwugou Watershed

1.3 数据处理与方法

数据的统计分析采用 SPSS17.0,主要使用单因素方差检验(ANOVA)和 T 检验,正态分布检验采用 Kolmogorov-Smirnov 方法。流域磷素的空间分布图在 ArcGIS10.1 中采用普通 Kriging 插值法进行绘制。

2 结果与分析

2.1 流域土壤全磷统计特征及空间分布

鹦鹉沟小流域不同土壤深度的土壤全磷含量统计特征见表 1。由表可知,流域土壤 A₁、A₂、A₃ 和 A₄ 的全磷含量均值分别为 0.54 g/kg、0.49 g/kg、0.48 g/kg 和 0.51 g/kg,经 ANOVA 检验,A₁、A₂、A₃ 和 A₄ 的土壤全磷含量存在显著性差异($P < 0.05$),土壤全磷含量的表现为 $A_1 > A_4 > A_2 > A_3$,其中 A₁ 层土壤全磷含量最高,说明表层 0~10 cm 土壤由于施肥、耕作等扰动,其土壤全磷含量最高^[14],而 A₄ 的土壤全磷含量大于 A₂ 和 A₃,主要是因为流域土壤浅薄且土石山区优先流发育所致^[15]。根据 Nielson (1985) 的分类系统:弱变异 $CV \leq 10\%$,中等变异 $10\% < CV < 100\%$,强变异 $CV \geq 100\%$ 。不同深度下土壤全磷基本呈现出随土壤深度增加土壤全磷的变异系数逐渐增大的规律,但流域土壤 A₁、

A_2 、 A_3 、 A_4 的土壤全磷含量均属于中等变异,其中 A_2 层土壤全磷的变异系数最小,为 56.7%, A_4 的变异系数最大,为 90.6%,说明土石山区的土壤全磷含量随着土壤深度增加,其分布越不均匀。

表 1 不同深度土壤全磷含量的统计特征
Tab. 1 The characteristics of soil total phosphorus of different soil layers

编号	土层深度/ (cm)	最小值/ (g/kg)	最大值/ (g/kg)	平均值/ (g/kg)	标准差	CV/ %	正态 分布
A_1	0~10	0.06	2.39	0.54	0.32	58.10	是
A_2	10~20	0.08	1.42	0.49	0.28	56.70	否
A_3	20~40	0.11	2.04	0.48	0.35	72.20	否
A_4	40~60	0.03	2.41	0.51	0.46	90.60	否

利用 SPSS 中的 Kolmogorov-Smirnov 方法对 A_1 、 A_2 、 A_3 和 A_4 的全磷含量数据进行正态分布检验,结果表明: A_1 层土壤全磷含量服从正态分布, A_2 、 A_3 和 A_4 全磷含量数据经过对数转换后均服从正态分布,可进行 Kriging 插值。为进一步分析鸚鵡沟小流域不同土壤深度全磷的分布特征,分别对 A_1 、 A_2 、 A_3 和 A_4 的土壤全磷进行 Kriging 插值,插值结果见图 2,从图中可以看出,鸚鵡沟流域土壤全磷呈斑块状分布,随土壤深度的增加,土壤全磷的分

布斑块逐渐由大变小。面积较大的土壤全磷含量高值斑块主要分布在流域出口和流域中游支流的汇合处。结合图 1 的土地利用类型可知,斑块面积较小的土壤全磷高值区主要分布在流域东北与西南方向的林地以及河流两岸的坡耕地。林地土壤全磷含量的高值斑块,如流域东北方向的土壤全磷含量斑块,说明林地能够有效保持土壤磷素。坡耕地土壤磷素含量较高是因为河岸两侧的低缓平地更适合农田开垦,施肥与耕作等因素导致土壤磷素含量较高^[16]。

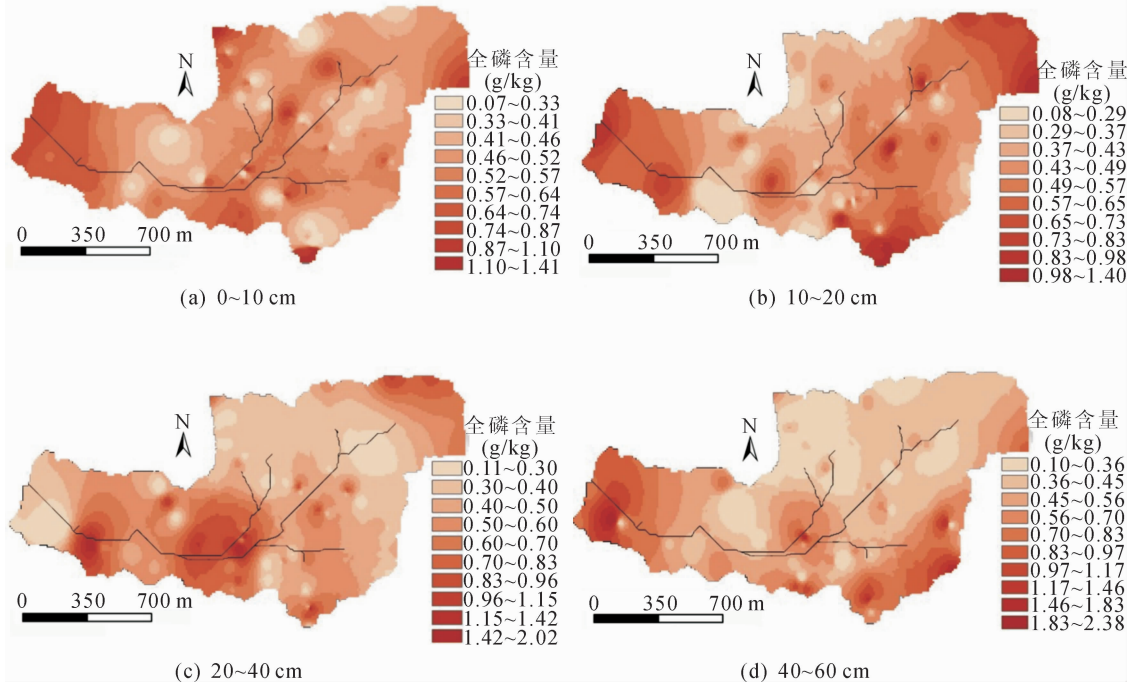


图 2 鸚鵡沟流域不同深度土壤全磷空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of soil total phosphorus content at four soil depth in Yingwugou Watershed

2.2 不同土地利用类型的土壤全磷含量特征

按照土地利用现状分类标准(GB/T 21010-2007),鸚鵡沟流域内主要有耕地、园地、林地、草地、住宅用地和水域等六类土地利用类型。耕地中的旱地主要种植花生和玉米,水浇地主要种植萝卜、豆角、辣椒等蔬菜;园地主要为茶园;林地为竹林、松林、栎树林等;草地按照分类标准与其他草地,以生

长禾本科草为主。经 SPSS 检验,不同土地利用方式下的磷素含量数据满足方差齐性要求,因此根据 LSD 的 T 检验结果,园地、草地与耕地的全磷含量之间均存在显著性差异($P<0.05$),且园地中茶园的全磷含量与耕地中红薯地的全磷含量呈现出极显著差异($P<0.001$)。

不同土地利用类型的土壤全磷含量见图 3,可

以看出, A_1 层土壤全磷平均值分别为: 竹林>花生>栎树>玉米>茶园>辣椒>萝卜>豆角>松林>草地; A_2 层为栎树>花生>萝卜>茶园>辣椒>松林>豆角>草地>玉米>竹林; A_3 层为松林>竹林>玉米>豆角>辣椒>栎树>萝卜>花生>草地>茶园; A_4 层为花生>竹林>草地>萝卜>辣椒>豆角>栎树>松林>玉米>茶园。园地、草地与耕地的土壤全磷含量差异显著, 可能是因为当地居民将土层较薄的坡面作为自用茶园, 茶园施肥量少或不施肥, 其土壤全磷含量较低, 而耕地处于土壤肥沃的缓坡, 种植作物的类型多且施肥量大, 导致土壤全磷含量较高。竹林土壤表层 0~10 cm 的全磷含量最高, 为 0.77 g/kg, 这是因为大部分竹林生长在地势较低的山坡坡脚处, 其保持土壤养分的能力较强; 栎树林主要分布于土壤立地条件较差的陡坡, 其 $A_1 \sim A_4$ 土壤全磷含量由 0.61 g/kg 逐渐递减至 0.42 g/kg, 但平均值为 0.51 g/kg, 仅次于耕地土壤全磷含量, 说明栎树林能够有效的保持土壤磷素。综上分析可知, 鹦鹉沟流域不同土地利用类型 0~60 cm 的土壤全磷含量均值表现为耕地>林地>草地>园地。

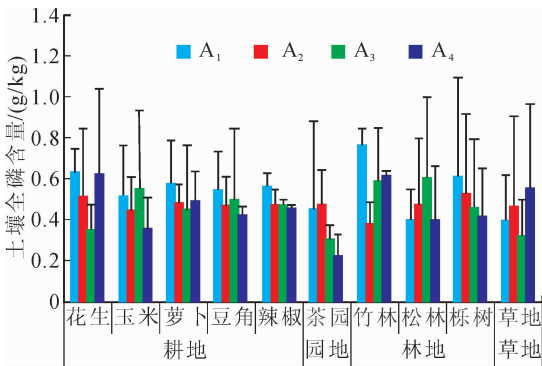


图3 不同土地利用类型下土壤全磷含量
Fig. 3 Soil total phosphorus content with different land use types

2.3 不同土地利用方式下的磷素流失浓度特征

与其他土地利用类型相比, 耕地土壤全磷含量最高且土壤磷素更易流失, 因此针对耕地土壤的磷素流失状况进一步分析, 并以草地作为对照。2010年7~9月, 共采集7场天然降雨条件下的耕地和草地径流小区的径流水样, 其总磷与速效磷流失浓度如图4所示。7场降雨条件下, 花生、玉米、萝卜、豆角、辣椒、草地的总磷平均流失浓度分别为: 7.04 ± 3.45 mg/L、 4.73 ± 2.65 mg/L、 8.97 ± 3.92 mg/L、 5.50 ± 2.01 mg/L、 6.17 ± 3.29 mg/L、 3.56 ± 1.38 mg/L, 可以看出, 玉米、花生、豆角、萝卜和辣椒的总磷流失浓度均比草地高, 经 ANOVA 检验存在显著性差异 ($P < 0.05$)。耕地中萝卜的总磷流失浓度最

高, 平均值达到 8.97 mg/L, 其总磷流失浓度达到草地的 2.5 倍, 与草地总磷流失存在极显著差异 ($P < 0.001$)。而不同土地利用类型下速效磷流失浓度与总磷流失浓度的规律并不一致, 7 场降雨径流过程中, 花生、玉米、萝卜、豆角、辣椒、草地速效磷的平均流失浓度分别为: 0.55 ± 0.28 mg/L、 0.24 ± 0.17 mg/L、 0.91 ± 0.31 mg/L、 0.52 ± 0.72 mg/L、 1.15 ± 0.70 mg/L、 0.67 ± 0.35 mg/L, 说明草地的速效磷流失浓度高于玉米、豆角和花生。

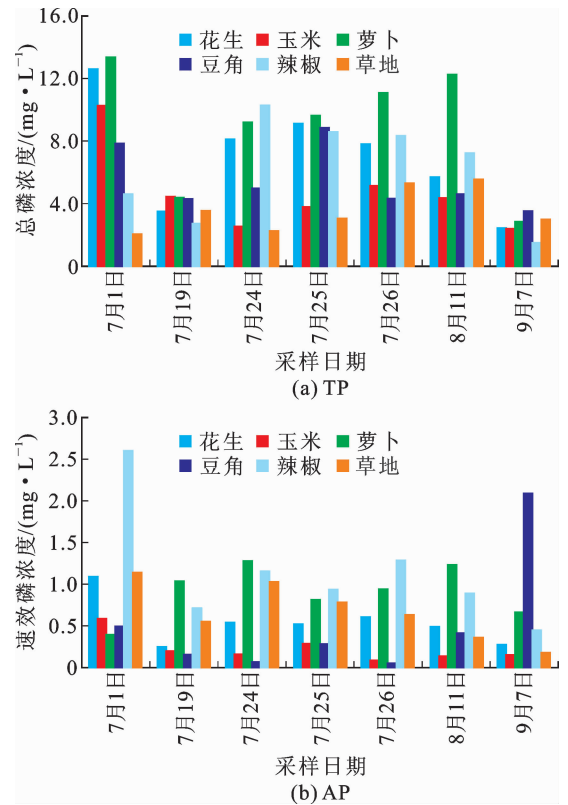


图4 2010年7场天然降雨下总磷和速效磷流失浓度
Fig. 4 The concentration of total phosphorus and available phosphorus losses of seven rainfall events in 2010

3 结论

1) 鹦鹉沟流域 A_1 、 A_2 、 A_3 和 A_4 土壤全磷含量均值分别为 0.54 g/kg、0.49 g/kg、0.48 g/kg 和 0.51 g/kg, 随着土壤深度的增加, 全磷含量的变异系数逐渐变大。ANOVA 检验表明: A_1 、 A_2 、 A_3 和 A_4 的土壤全磷含量存在显著性差异 ($P < 0.05$), 土壤全磷含量的表现为 $A_1 > A_4 > A_2 > A_3$ 。

2) Kriging 插值表明: 流域土壤全磷呈现斑块状分布, 并随土壤深度的增加, 土壤全磷的分布斑块逐渐由大变小。面积较大的土壤全磷含量高值斑块主要分布在流域出口和流域中游支流的汇合处, 斑块面积较小的土壤全磷高值区主要分布在流域东北与西南方向的林地以及河流两岸的坡耕地。

3) 鸚鵡沟流域不同土地利用方式下土壤 0~60 cm 全磷的均值含量表现为耕地>林地>草地>园地。竹林表层 0~20 cm 土壤的全磷含量最高,为 0.77 g/kg。茶园、草地与耕地的全磷含量存在显著性差异($P<0.05$),其中茶园与耕地中红薯地的全磷含量呈现出极显著差异($P<0.001$)。

4) 耕地中的豆角、萝卜、辣椒、玉米、花生的总磷流失浓度均比草地高且均与草地达到显著性差异($P<0.05$),其中萝卜小区的总磷流失浓度最大,均值为 8.97 mg/L,其总磷流失浓度达到草地的 2.5 倍,与草地总磷流失存在极显著差异($P<0.001$)。

参考文献:

- [1] 汪涛, 杨元合, 马文红. 中国土壤磷库的大小、分布及其影响因素[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2008, 44(6): 945-951.
WANG Tao, YANG Yuanhe, MA Wenhong. Storage, pattern and environmental controls of soil phosphorus in China[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2008, 44(6): 945-951.
- [2] BRONSON K F, ZOBECK T M, CHUA T T. Carbon and nitrogen pools of southern high plains cropland and grassland soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(5): 1695-1704.
- [3] 文波龙, 刘兴土, 张乃明. 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[J]. 土壤学报, 2012, 49(1): 173-178.
WEN Bolong, LIU Xingtu, ZHANG Naiming. Spatial variation of soil phosphorus in farmland and its effects on surface runoff pollution load in the Daqinghe Watershed of Dianchi Lake[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(1): 173-178.
- [4] 晏维金, 章申, 唐以剑. 模拟降雨条件下沉积物对磷的富集机理[J]. 环境科学学报, 2000, 20(3): 332-337.
YAN Weijin, ZHANG Shen, TANG Yijian. Sediment enrichment mechanisms of phosphorus under simulated rainfall conditions [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2000, 20(3): 332-337.
- [5] 陈欣, 王兆骞, 杨武德, 等. 红壤小流域坡地不同利用方式对土壤磷素流失的影响[J]. 生态学报, 2000, 20(3): 374-378.
CHEN Xin, WANG Zhaoqian, YANG Wude, et al. Effects of sloping land use patterns on phosphorus loss in a micro watershed of red soil area, Southern China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(3): 374-378.
- [6] FOY R H, WITHERS P J A. The contribution of agricultural phosphorus to eutrophication [J]. Fertiliser Society, 1995, 365(15): 1-32.
- [7] THOMANN R V, MUELLER J A. Principle of surface

water quality modeling and control [M]. New York: Harper and Row Publishers, 1987.

- [8] HAVENS K E, SCHELSKE C L. The importance of considering biological processes when setting total maximum daily loads (TMDL) for phosphorus in shallow lakes and reservoirs[J]. Environmental Pollution, 2001, 113(1): 1-9.
- [9] JIAO J G, ELLIS E C, YESILONIS I, et al. Distributions of soil phosphorus in China's densely populated village landscapes[J]. Journal of Soils and Sediments, 2010, 10(3): 461-472.
- [10] 黄萍萍, 李占斌, 徐国策, 等. 基于田块尺度的丹江上游坡改梯土壤养分空间变异性研究[J]. 西安理工大学学报, 2013, 29(3): 307-313.
HUANG Pingping, LI Zhanbin, XU Guoce, et al. Research on spatial heterogeneity of soil nutrient on slope cropland and terraced field scales in the upper reaches of the Danjiang River[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2013, 29(3): 307-313.
- [11] 贺敬滢. 土地利用与景观部位对土壤磷分布的影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
HE Jingying. Study on the influence of land use and landscape position on the distribution of the phosphorus in the soil[D]. Yang ling: Northwest A&F University, 2012.
- [12] WITHERS P J A, HODGKINSON R A, BATES A, et al. Soil cultivation effects on sediment and phosphorus mobilization in surface runoff from three contrasting soil types in England [J]. Soil and Tillage Research, 2007, 93(2): 438-451.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- [14] 宋春, 韩晓增. 长期施肥条件下土壤磷素的研究进展[J]. 土壤, 2009, 41(1): 21-26.
SONG Chun, HAN Xiaozeng. Advances in phosphorus in long-term fertilized soil[J]. Soils, 2009, 41(1): 21-26.
- [15] 李学平, 邹美玲. 农田土壤磷素流失研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(11): 173-177.
LI Xueping, ZOU Meiling. Advance of farmland soil phosphorus running off[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(11): 173-177.
- [16] 王洪杰, 李宪文, 史学正, 等. 不同土地利用方式下土壤养分的分布及其与土壤颗粒组成关系[J]. 水土保持学报, 2003, 17(2): 44-50.
WANG Hongjie, LI Xianwen, SHI Xuezheng, et al. Distribution of soil nutrient under different land use and relationship between soil nutrient and soil granule composition[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(2): 44-50.