

估算紫色土流域地下水非点源污染负荷的降雨量参数法

高 扬^{1,2}, 朱 波¹, 汪 涛¹, 唐家良¹, 周 培²

(1.中国科学院成都山地灾害与环境保护研究所, 成都 610041; 2.上海交通大学环境科学与工程学院, 上海 200240)

摘 要:非点源污染是生态环境建设中遇到的关键问题之一,本文以四川省盐亭农业生态试验站流域的地下水为例,通过设定降雨量参数,将降雨量与地下水非点源污染负荷联系起来,分别研究了地下水磷素与地下水氮素随降雨量的变化情况。研究发现两个研究区的 TP、TN 浓度与降雨量的相关性十分明显,相关系数 R^2 分别为 0.987、0.947 5、0.933 1 和 0.901 8,而其他形态的氮和磷与降雨量的相关性并不明显;另外,研究发现地下水非点源 TN 污染主要是由于 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度变化引起的,地下水非点源磷污染主要是由于颗粒态磷浓度变化引起的。

关键词:非点源污染;磷;氮;降雨量;模型

中图分类号:X523 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)02-0352-05

Assessment of the Effect of Non-point Source Pollution on Groundwater in Purple Soil Watershed Using Rainfall Parameter Method

GAO Yang^{1,2}, ZHU Bo¹, WANG Tao¹, TANG Jia-liang¹, ZHOU Pei²

(1.Institute of Mountain Hazards and Environment, the Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2.Department of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The non-point source pollution is one of the key problems in the construction of ecological agriculture. This paper, based on the groundwater of the agriculture ecology station at Yanting City, Sichuan Province, contacted the non-point source pollution transport with groundwater through rainfall parameter method and studied the changing on phosphorus and nitrogen in groundwater with the rainfall duration, respectively. The results showed that, the relationship between rainfall and the transport concentration of TP and TN in two studied areas were prominent, and the correlative coefficient R_2 were 0.987, 0.947 5, 0.933 1 and 0.901 8, respectively, but the relationship between rainfall and the other forms of nitrogen and phosphorus were not significantly. Moreover, the non-point source TN pollution in groundwater was mostly caused by the change in $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration, and the non-point source P pollution in groundwater was mostly caused by the change in particle form of phosphorus.

Keywords: non-point source pollution; phosphorus; nitrogen; rainfall; model

随着地表水资源的日趋紧张,地下水资源已成为日常生活和农田灌溉用水不可替代的水资源。非点源污染(NSP)的危害性随着对点源污染控制能力的提高而逐渐表现出来,非点源污染势必成为地表水和地下水污染的主要来源。国内外现有 NSP 负荷预测模型中,考虑污染物迁移机理的模型由于对资料要求条

件高,参数众多,率定困难,很难推广^[1]。关于降雨径流和渗透引起地下水非点源污染方面,由于监测难度大、缺乏长期同步水质监测数据等原因,尚未有一系列完整的估算方法和模型可以运用。目前这些国外的非点源污染模型在黄河流域、滇池流域以及东南亚进行适应性研究,均取得较好的模拟结果^[2-5];朱波等^[6-10]对紫色土流域氮磷流失做了相关的报道,指出川中地区氮磷流失势必加剧长江三峡的水体富营养化。

本文以紫色土流域的地下水为例,通过设定降雨量参数,将降雨量与地下水非点源污染负荷联系起来,找出其相关关系,尝试建立适合于紫色土流域的地下水非点源污染的估算模型。

收稿日期:2009-06-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40571093);中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB2-07-02)

作者简介:高 扬(1981—),男,博士,助教,主要研究方向为环境化学与环境毒理学。gaoyang0898@sjtu.edu.cn

通讯作者:朱 波 bzhu@imde.ac.cn
周 培

1 降雨参数设置的原理

地下水的污染主要包括点源和非点源污染,将点源和非点源污染区分开来一直很难解决。本文主要采取对比的方法来解决这个难点,将非点源引起地下水污染用下面的公式来表示:

$$W_f = f(R) \quad (1)$$

将人类活动(包括打水,在周围洗衣服),以及猪、牛、羊等生物活动,还有地表径流引起的地下水点源污染的用常数来表示:

$$W_d = C \quad (2)$$

而地下水总污染则表示为:

$$W_z = W_f + W_d = f(R) + C \quad (3)$$

式中: W_f 为非点源引起的地下水污染; W_d 为点源引起的地下水污染; W_z 为点源和非点源引起的地下水污染; $f(R)$ 为地下水非点源污染与降雨量 R 的函数关系。

将植被覆盖和吸收、集水区汇水、土壤物理状况、地形因素等引起降雨流入地下水水量减少的因子设为参数 β , 则每次降雨给地下水带来的水量表示为:

$$Q_m = SR(1-\beta) \quad (4)$$

式中: S 表示流域面积; Q_m 表示降雨所带来的地下水。则地下水非点源污染负荷为:

$$W_f = SR(1-\beta)C_i \quad (5)$$

式中: C_i 近似为第 i 次测量地下水污染物的浓度。

这样,地下水污染总负荷就可以表示为:

$$W_z = \sum_{i=1}^n SR(1-\beta)C_i + C \quad (6)$$

由(1)~(6)式可推出降雨量与地下水监测的污染物浓度的关系式为:

$$C_i = \frac{f(R)}{SR(1-\beta)} + C \quad (7)$$

(7)式建立了降雨量与地下水污染物监测的函数关系,由于点源给地下井水造成的污染有限,可将监测井水的浓度视为近似于由非点源污染造成,点源污染都由一个常数 C 表示。

2 研究流域和采样井水概况

流域位于四川盆地中部紫色土丘陵地带的中国科学院紫色土盐亭农业生态试验站,具有四川盆地亚热带湿润季风气候特征。地形为中深丘,海拔 400 m~600 m,由于水平砂泥岩互层形成多级梯地,山顶为园

丘、长岗状,土壤为钙质紫色土,质地为中壤^[11],多年平均降雨量 836 mm,主要集中在 6—9 月,汛期暴雨暴落,不利农田灌溉,四周分布有沟道,但源短流细,纯属雨水补给性溪流^[12]。选择的盐亭站小流域具有典型的川中丘陵特点,土地利用类型、农业耕作与管理、农业结构与农村生态环境状况具有较好的代表性,其土地利用状况见表 1。

表 1 盐亭站小流域土地利用现状

Table 1 Land use of Yanting watershed

面积/hm ²									
林地	旱地	两季田	水田	道路	水塘	堤坝	居民地	荒地	总面积
12.14	15.64	2.39	1.54	0.63	0.21	0.11	1.71	0.27	34.64

本试验所采样的井水为张飞井和张飞上井(图 1),其具体描述如下:

张飞上井:位于小流域中下部,上方是居民区小路和农户,下方 0.5 m 处是两季田田端沟道,农户常在此洗衣,牛和鸡常在井附近活动,井口未封,地表径流、自然降雨、淋溶渗透作用、人类和生物活动均有影响,井深约 3.04 m。

张飞井:位于居民房后,离沟道有 4 m 远,地势高,井口用大石封住,不受农田和地表水影响,可将点源污染忽略,井深约 11 m。

井水采样的时间为 2005 年 4 月—2006 年 12 月,每个月的 20 日采样,分析地下水的总磷(TP)、磷酸盐、总氮(TN)、硝态氮、亚硝态氮、氨态氮。具体分析见《水环境要素观测与分析》^[13]。

3 结果与讨论

3.1 降雨量与地下水磷素的关系

如图 2 和图 3 所示,TP 的浓度随降雨量呈现季节性变化,而磷酸盐浓度随降雨量的变化并不很明显,一直比较平稳。在枯水期,磷酸盐占 TP 的比重达到 70%~90%,而在丰水期,其比重下降到 30%~50%,说明大量降雨后引起地下水磷浓度变化,主要是由于颗粒态磷浓度增大,磷酸盐方面变化很小。运用降雨量参数法,对张飞井和张飞上井磷浓度和降雨量进行相关性分析:

张飞井 TP 浓度和降雨量的关系:

$$y = 0.000\ 2x + 0.006\ 7 \quad (R^2 = 0.987\ 0) \quad (8)$$

张飞上井 TP 浓度和降雨量的关系:

$$y = 0.000\ 5x + 0.007\ 7 \quad (R^2 = 0.947\ 5) \quad (9)$$

张飞井磷酸盐浓度和降雨量的关系:

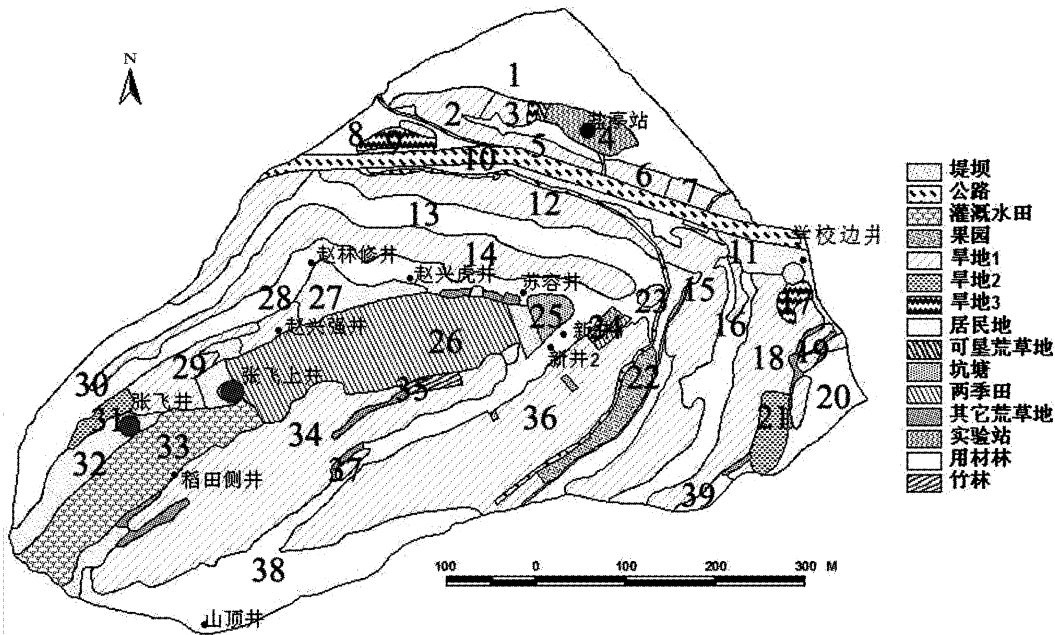


图 1 采样点位置示意图

Figure 1 Sketch map of sample points location

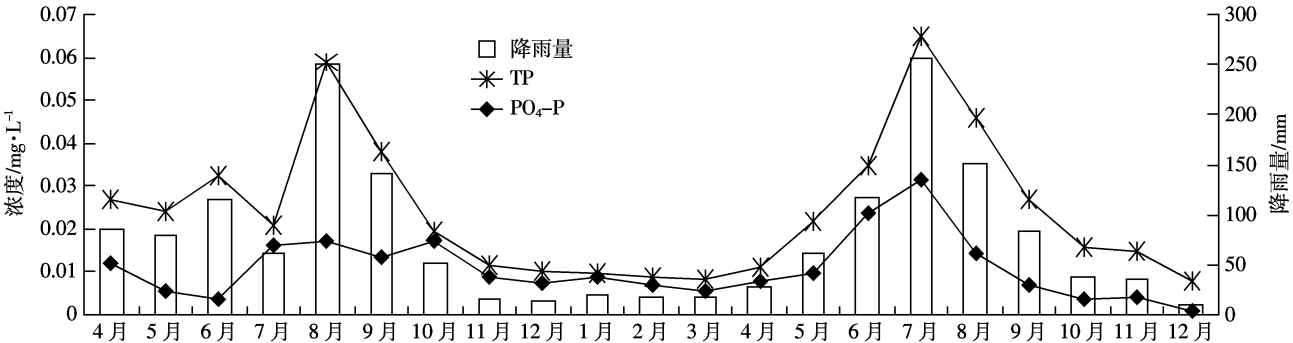


图 2 张飞井磷浓度和降雨量的变化

Figure 2 Changes of phosphorus and rainfall in Zhangfei Well

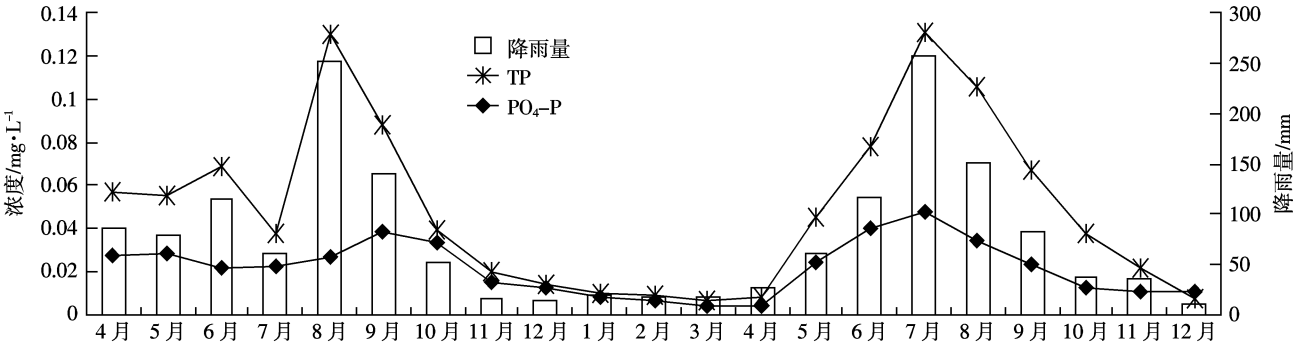


图 3 张飞上井磷浓度和降雨量的变化

Figure 3 Changes of phosphorus and rainfall in Zhangfei Up-well

$y=7E-0.5x+0.005 \quad (R^2=0.5083)$ (10)

张飞上井磷酸盐浓度和降雨量的关系:

$y=0.0252x+3.4322 \quad (R^2=0.6047)$ (11)

由式(8)~(9)看出,降雨量参数法用于估算 TP

可取得很好的效果。尤其是张飞井,因为受外界干扰小,其 TP 浓度变化和降雨量表现出明显的相关性,而张飞上井由于点源污染的干扰,其相关性要差一些;磷酸盐浓度变化与降雨量没有明显的相关性,因此在

估算磷酸盐浓度方面效果并不理想。

3.2 降雨量与地下水氮素的关系

图 4 和图 5 为地下水氮和降雨量的关系。可以看出,TN 和 TP 浓度一样呈季节性的变化,NO₃-N 和 TN 随着降雨量的大小呈现有规律的波动,NO₃-N 占 TN 比重达到 80%以上,而 NH₄-N 和 NO₂-N 由于浓度很小所以无法看出其变化规律,因此将各个形态氮做了相关性分析见表 2 和表 3。从图中还可以看出,张飞上井的 TN 和 NO₃-N 的浓度值是张飞井的 3~4 倍,并且已经超出引用水标准(10 mg·L⁻¹)。

由表 2 和表 3 可以看出,降雨量参数法在估算 TN 方面效果都较理想,其相关性都达到了 0.9 以上;而 TN 和 NO₃-N 表现出较明显的相关性,其他各形态氮与降雨以及各形态氮间均没有相关性。张飞井与张飞上井 TN 浓度变化与降雨量的具体相关分析为:

张飞井 TN 浓度和降雨量的关系:
 $y=0.015\ 8x+0.365\ 2\ (R^2=0.933\ 1)$ (12)

张飞上井 TN 浓度和降雨量的关系:
 $y=0.032\ 8x+3.401\ 2\ (R^2=0.901\ 8)$ (13)

3.3 讨论

(1)降雨量参数法在估算地下水 TP 和 TN 都取

表 2 张飞井各形态氮素与降雨量相关性分析

Table 2 Correlation analysis of nitrogen and rainfall in Zhangfei Well

张飞井	降雨量	TN	NO ₃ -N	NH ₄ -N	NO ₂ -N
降雨量	1	0.933 1	0.834 6	0.173 7	0.022
TN	0.933 1	1	0.943	0.094 2	0.052 1
NO ₃ -N	0.834 6	0.943	1	0.049 3	0.070 2
NH ₄ -N	0.173 7	0.094 2	0.049 3	1	0.056
NO ₂ -N	0.022	0.052 1	0.070 2	0.056	1

表 3 张飞上井各形态氮素与降雨量相关性分析

Table 3 Correlation analysis of nitrogen and rainfall in Zhangfei Up-well

张飞上井	降雨量	TN	NO ₃ -N	NH ₄ -N	NO ₂ -N
降雨量	1	0.901 8	0.79	0.011	0.072 8
TN	0.901 8	1	0.914 3	0.021	0.081 4
NO ₃ -N	0.79	0.914 3	1	0.012 2	0.052 4
NH ₄ -N	0.011	0.021	0.012 2	1	0.004 97
NO ₂ -N	0.072 8	0.081 4	0.052 4	0.049 7	1

得了很好的效果,相关性均达到 0.9 以上。张飞井点源污染引起地下水 TP 浓度变化为 0.006 7 mg·L⁻¹,张飞上井的为 0.007 7 mg·L⁻¹,这和实际监测情况也相

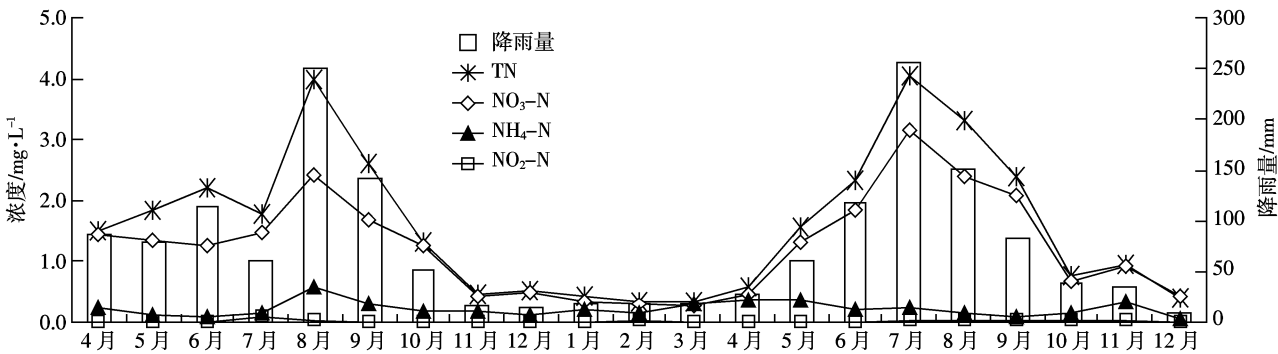


图 4 张飞井氮浓度和降雨量的变化
Figure 4 Changes of nitrogen and rainfall in Zhangfei Well

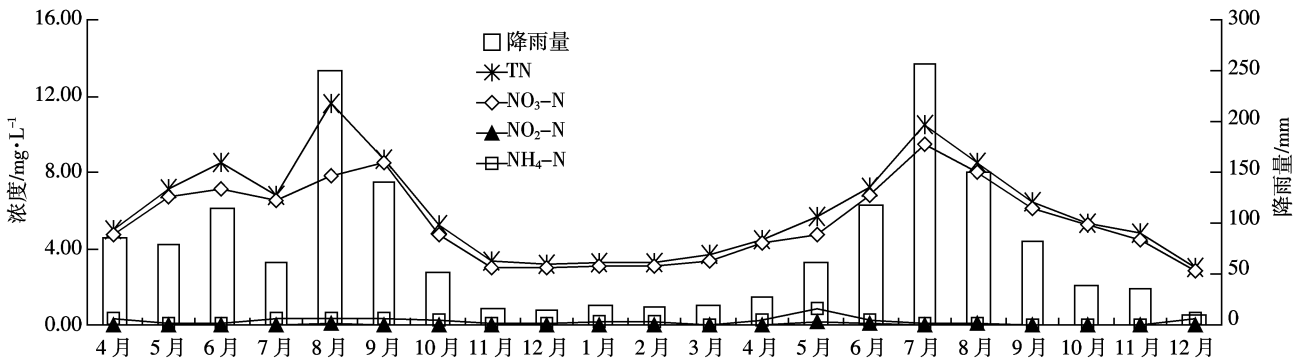


图 5 张飞上井氮浓度和降雨量的变化
Figure 5 Changes of nitrogen and rainfall in Zhangfei Up-well

符合,说明点源污染对地下水磷的污染影响不是很大;在 TN 浓度变化方面,张飞井是 $0.365\ 2\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,张飞上井是 $3.401\ 2\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,这表明点源污染主要影响地下水氮的浓度。张飞上井由于生物活动频繁和井口未封盖等影响,其浓度值是张飞井的 10 倍左右,已成为影响该处井水质量一个比较重要的因子。

(2)张飞上井的 TN 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的浓度值是张飞井的 3~4 倍,可以看出张飞上井点源和非点源污染都比较严重;两处井水 TN 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 表现出极强的相关性, $\text{NO}_3\text{-N}$ 占 TN 比重达到 80%以上,说明地下水非点源 TN 污染主要是由于 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度变化引起的。 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ 受降雨量影响和其对地下水污染的影响目前表现还不是很明显。

(3)井水中磷酸盐浓度受降雨影响较小,表明地下水非点源磷污染主要是由于颗粒态磷浓度变化引起的。

(4)居民打井做生活用水水源时应将井点取在地势高、不受农田渗透淋溶影响的地方,同时要把井打得深一些,还要保护好井的周边环境,尽量将井口加封盖以免受外界的干扰。这样,可以确保居民饮用健康的地下水。

4 结语

本文提出的降雨量参数法,是根据有限的监测资料估算地下水非点源污染负荷量的简便而有效的方法。运用参数设置省略了产汇流和径流分割过程,同时考虑了大气沉降和人类活动等因素,直接建立了降雨量与非点源污染负荷之间的相关关系,可以用来预测地下水年非点源污染负荷,又可预测单场降雨产生的非点源污染负荷,是一种简便有效的地下水非点源污染负荷估算方法。

此方法的不足之处在于,降雨引起非点源污染的浓度以当月监测的地下水浓度来替代;点源污染引起的地下水污染浓度以常数来表示,实际是这个值是变化的,目前的方法和监测技术还不能将它们细化,只能用参数方法进行估算。考虑到降雨径流的复杂性,这种误差在可接受的范围内,加之地下水非点源污染监测资料的不完善,因此该方法可以作为流域污染负荷预测的方法之一加以应用。

参考文献:

[1]李怀恩,沈 晋. 非点源污染数学模型[M]. 西安:西北工业大学出版社,1996.

Li H N, Shen J. Mathematical model of non-point pollution[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1996.

[2]邢可霞,郭怀成,孙延枫,等. 基于 HSPF 模型的滇池流域非点源污染模拟[J]. 中国环境科学, 2004, 24(2): 229-232.

Xing K X, Guo H C, Sun Y F, et al. Simulation of non-point source pollution in Lake Dianchi basin based on HSPF model[J]. *China Environmental Science*, 2004, 24(2): 229-232.

[3]Hao F H, Zhang X S, Yang Z F. A distributed non-point source pollution model calibration and validation in the Yellow River Basin[J]. *Journal of Environmental Science*, 2004, 16(4): 626-650.

[4]Cronshey R G, Theurer F G. AnnAGNPS non-point pollutant loading model[C]//First Federal Interagency Hydrologic Modeling Conf, Las Vegas, Nevada, 1998.

[5]黄金良,洪华生,杜朋飞,等. AnnAGNPS 模型在九龙江典型小流域的适用性检验[J]. 环境科学学报, 2005, 25(8): 1136-1141.

Huang J L, Hong H S, Du P F, et al. Testing AnnAGNPS for water quality modelling in the typical sub-watersheds in Jiulong River watershed [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(8): 1136-1141.

[6]朱 波,汪 涛,况福红,等. 紫色土耕地硝酸盐淋失特征[J]. 环境科学学报, 2008, 28(3): 525-533.

Zhu B, Wang T, Kuang F H, et al. Characteristic of nitrate leaching from hilly cropland of purple soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(3): 525-533.

[7]Gao Yang, Zhang Jinzhong, Zhu Bo, et al. Phosphorus transport with runoff of simulated rainfall from purple-soil cropland of different surface conditions[J]. *Journal of Chongqing University (English Edition)*, 2008, 7(2): 85-92.

[8]高 扬,朱 波,汪 涛,等. 人工模拟降雨条件下紫色土坡地生物可利用磷的输出[J]. 中国环境科学, 2008, 28(6): 542-547.

Gao Y, Zhu B, Wang T, et al. Purple soil sloping land bio-available phosphorus transported out under the condition of artificial simulated rainfall[J]. *China Environmental Science*, 2008, 28(6): 542-547.

[9]高 扬,朱 波,周 培,等. 紫色土坡地氮素和磷素非点源输出模拟研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 28(7): 1371-1376.

Gao Y, Zhu B, Zhou P, et al. Non-Point source export of nitrogen and phosphorus from slope crop of purple soil with simulated rainfall method [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 28(7): 1371-1376.

[10]高 扬,朱 波,王玉宽,等. 自然降雨和人工降雨条件下紫色土坡地磷素迁移比较[J]. 水土保持学报, 2006, 20(5): 34-37.

Gao Y, Zhu B, Wang Y K, et al. Phosphorus transportation from slope cropland of purple soil at natural and stimulated rainfall events [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(5): 34-37.

[11]何毓蓉. 中国紫色土(下)[M]. 北京:科学出版社, 2003.

He Y R. Chinese purple soil (down)[M]. Beijing: Science Press, 2003.

[12]马立珊. 农田氮素管理与环境质量和作物品质[M]//朱兆良,文启孝. 中国土壤氮素. 南京:江苏科技出版社, 1992: 267-287.

Ma L S. Agricultural nitrogen management and environmental quality and crop quality[M]//Zhu Z L, Wen Q X. Chinese soil nitrogen. Nanjing: Jiangsu Science Press, 1992: 267-287.

[13]谢贤群,王立军. 水环境要素观测与分析[M]. 北京:中国标准出版社, 1998: 275-278.

Xie X Q, Wang L J. Aquatic environmental element observation and analyze[M]. Beijing: Chinese Standard Press, 1998: 275-278.