

基于垂向混合产流模型的北京山区山洪预警模型构建

宋瑶¹, 程金花¹, 胡晓静², 叶芝菡², 吴敬东², 石坤¹, 张洪江¹

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2. 北京市水科学技术研究院, 北京 100048)

摘要: [目的] 构建基于垂向混合产流模型的北京山区山洪预警模型, 为临界雨量的计算提供理论基础。[方法] 结合北京市的气候条件, 选用垂向混合产流模型进行产流模拟, 用单位线法和线性水库法进行坡面汇流模拟, 用马斯京根法进行河道汇流模拟。安全流量则用淹没出流量代表。北京山区山洪预警模型中的参数可通过外业实验测定和历史数据率定获得。[结果] 通过对降雨和流量历史资料的验证, 确定性系数、洪峰流量、峰现时间、时效等级均符合洪水预报的要求和规定, 是否发生山洪的预测结果也与实际情况一致, 证明了该模型的准确性。[结论] 该模型可以应用于北京山区的山洪预警, 降低由山洪导致的人员伤亡与财产损失的可能性。同时, 该模型还可为北京山区山洪灾害临界雨量的推求奠定基础。

关键词: 北京山区; 山洪预警模型; 水文模拟; 垂向混合产流模型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)03-0353-05

中图分类号: P333

文献参数: 宋瑶, 程金花, 胡晓静, 等. 基于垂向混合产流模型的北京山区山洪预警模型构建[J]. 水土保持通报, 2016, 36(3): 353-357. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.03.060

Establishment of Early Warning Model for Flood in Mountainous Area of Beijing City Based on Vertical-mixed Runoff Model

SONG Yao¹, CHENG Jinhua¹, HU Xiaojing², YE Zhihan², WU Jingdong², SHI Kun¹, ZHANG Hongjiang¹

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100048, China)

Abstract: [Objective] To establish a flood warning model for the mountainous area of Beijing City based on vertical-mixed runoff model in order to provide theoretical basis for the calculation of critical rainfall. [Methods] Considering the weather conditions in Beijing City, vertical-mixed runoff model was used to simulate runoff generation, unit hydrograph and linear reservoir method were applied to simulate overland runoff concentration, Muskingum method to simulate flood routing, and submerged discharge was used to represent safety discharge. The parameters of a flood warning model in the area can be determined by field experiment and calibrated by historical data. [Results] Coefficient of determination, peak-flood discharge, peak time and aging level conformed to the requirement and regulation of mountain flood forecasting through the validation of historical precipitation and hydrological data. In addition, the predicted possibility of a flood is in accordance with reality. [Conclusion] The accuracy of this model is good and can be applied to the early warning of flood in Beijing mountainous area with confidence, thus reducing casualties and property losses. This model also lays a foundation for the calculation of critical rainfall of flood in the mountainous area of Beijing City.

Keywords: mountainous area of Beijing City; early warning model of flood; hydrological simulation; vertical-mixed runoff model

7·21 特大暴雨对北京地区尤其是山区造成了巨大的经济损失和人员伤亡, 山区河道监测和预警的欠缺是引发此次山洪灾害的主要原因。因而, 在北京

地区因地制宜地选用恰当的模型, 建立完善的山洪预警系统, 提高预警准确性势在必行。国外已有完善的以水文模型为基础的山洪预警系统, 例如美国在

收稿日期: 2015-03-12

修回日期: 2015-06-23

资助项目: 北京市科技计划“山区河流局地暴雨灾害影响及综合治理示范研究”, “山区山洪发生规律和预警技术研究”(Z121100000112008-3)

第一作者: 宋瑶(1992—), 女(汉族), 北京人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持。E-mail: 408759619@qq.com。

通讯作者: 程金花(1979—), 女(汉族), 山东省东阿市人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持以及森林水文研究。E-mail: jinhua_cheng@126.com。

2007 年 4 月发布的山洪指导系统 (FFGS)^[1]、水文预报服务系统 (AHPS) 和分布式水文模型山洪预报系统 (HEC-DHM)^[2]。中国的胡维忠等^[3]针对山洪预警系统的结构和设计原则作了详尽的阐述,孙加龙^[4]在小范围山洪预警系统的基础上,提出了省级系统的思路,并将 WEB 框架和模板技术应用于预警监测系统。

北京地处华北平原东北部, $115^{\circ}25'—117^{\circ}30'E$, $39^{\circ}28'—41^{\circ}05'N$, 山区面积约占 62%, 海拔为 1 000 ~ 1 500 m。北京山区集中在西、北、东三面, 面积达到 1.04 km²。北京地处半干旱半湿润地区, 气候为典型的北温带半湿润大陆性季风气候, 多年平均降水量为 585 mm。由于山区相对高差较大, 存在气候的垂直地带性, 低山区为暖温带半湿润季风气候, 中山区则是半湿润—半干旱季风气候, 1 600 m 以上的高山区是寒温带半湿润—湿润季风气候。

本文拟以垂向混合产流模型为基础, 构建北京山区山洪预警模型, 并在蛇鱼川小流域和漫水河小流域进行应用, 确定模型中的参数, 检验模型的准确性。以期为临界雨量的计算提供理论基础, 为北京今后的山洪灾害预警提供借鉴。

1 模型构建

本模型通过气象部门发布的降雨预报, 模拟产流和汇流过程, 预测河道各断面的洪水过程, 与安全流量相对比, 当预测流量大于安全流量时预警。根据流域面积等条件, 因地制宜地将河网划分为多个小单元, 在各小单元内分别计算未来一段时间净雨的产流过程和坡面汇流过程。经过垂向混合产流模型可得到地面径流和地面以下径流, 分别对二者采用单位线法和线性水库法计算坡面汇流后小单元出口处的地面径流和地面以下径流的总量。从小单元流出即进入河网, 通过马斯京根河网汇流计算后, 即可得到流域内指定断面的流量。若流域较小, 则无需考虑河网汇流。最后, 与安全流量比较, 确定是否需要预警。本研究中以出槽流量作为安全流量, 漫滩即需要预警。北京山区山洪预警模型结构如图 1 所示。

本模型是基于垂向混合产流模型产流原理建立的。产流模型要符合北京的实际情况和产流方式。北京地处半干旱半湿润地区, 是典型的暖温带半湿润大陆性季风气候, 夏季高温多雨, 冬季则是寒冷干燥, 春、秋较短。以 2007 年为例, 平均降雨量 483.9 mm, 为华北地区降雨最多的地区之一。降水季节分配非常不均, 全年降水的 80% 集中在夏季 6, 7, 8 这 3 个月, 是山洪灾害的易发时段。

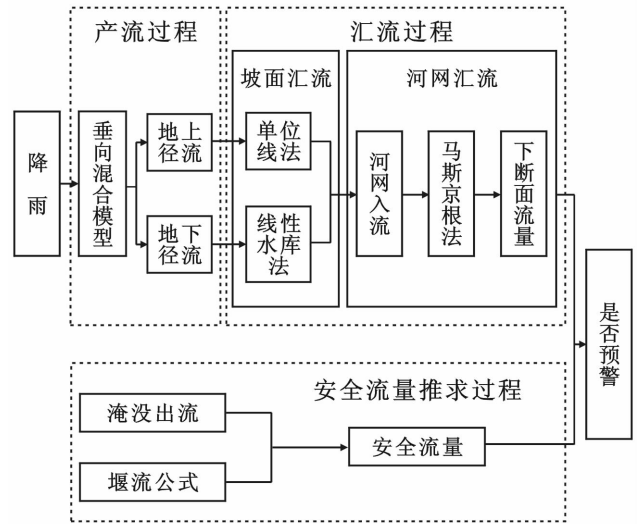


图 1 北京山区山洪预警模型结构

超渗产流和蓄满产流是产流理论计算中的 2 个模型。蓄满产流模型适宜湿润地区, 超渗产流适宜干旱地区^[5]。目前在国内的山洪预警模型多是基于新安江模型进行水文计算, 但是由于新安江模型主要是以蓄满产流的产流机制为主, 适用于南方湿润地区^[6], 所以在此次研究中并不适用。垂向混合产流模型是将湿润地区和干旱地区的产流计算方法结合, 在超渗产流和蓄满产流并存的产流机制下提出的^[7], 适用于半干旱半湿润地区^[8], 且已经在唐山、承德^[9]和辽宁^[10]等距离北京较近的北方地区应用, 并获得了很好的效果。

蓄满产流和超渗产流是可以相互转换的。相同地区的不同气候条件下, 一场洪水的前期和后期, 都可能存在产流方式的转化, 使用单一的产流方式, 必定会存在一定的误差。

在过去的混合产流研究中, 蓄满产流和超渗产流是通过面积比例系数结合的, 这一系数通常为定值。相比其它通过面积比例结合的混合产流计算方法, 垂向混合产流模型将气候对面积比例系数的影响纳入考虑, 提高了混合产流的准确性。垂向混合产流模型将水平分布的超渗产流和蓄满产流通过面积比例系数 α 进行垂向的组合。

通过空间分布下渗曲线, 降雨分为地表径流和下渗部分。下渗水流在补充土壤缺水量后, 若仍有盈余, 则产生地面以下径流 (地下径流和壤中流), 故地下径流的产生受下渗水量和前期土壤含水量的影响, 符合蓄满产流机制, 应用蓄满产流几只计算地下径流。

地表径流的产生受前期土壤含水量和雨强的影响, 符合超渗产流机制, 应用超渗产流模型的计算公式。垂向混合产流模型的计算过程如下。

(1) 地表径流的计算。地表径流采用格林—安普特下渗曲线计算,公式如下:

$$F_M = F_C \left(1 + K_F \frac{W_M - W}{W_M} \right) \quad (1)$$

若 $P_E > F_M(B_F + 1)$, $F_A = F_M$;

若 $P_E < F_M(B_F + 1)$,

$$F_A = F_M - F_M \left[1 - \frac{P_E}{F_M(B_F + 1)} \right] \quad (2)$$

$$R_S = P_E - F_A \quad (3)$$

式中: F_M ——流域平均下渗能力(mm/h); F_C ——稳定下渗率(mm/h); K_F ——土壤含水量对下渗率影响的灵敏度系数; W_M ——流域平均蓄水量(mm); B_F ——下渗能力空间分布特征参数; W ——初始土壤平均含水量(mm); P_E ——扣除雨间蒸发的降雨量(mm); R_S ——地表径流(mm)。

(2) 地面以下径流的计算。地面以下径流包括地下径流和壤中流,应用蓄满产流模型进行计算,公式如下:

$$a = W_M(B+1) \left[1 - \left(1 - \frac{W}{W_M} \right)^{B+1} \right] \quad (4)$$

若 $F_A + a < W_M(B+1)$

$$R_R = F_A + W - W_M + W_M \left(1 - \frac{F_A + a}{W_M(B+1)} \right)^{B+1}$$

若 $F_A + a \geq W_M(B+1)$, $R_R = F_A + W - W_M$

式中: R_R ——地下径流(mm)。

(3) 总径流量的计算。

$$R = R_R + R_S \quad (5)$$

式中: R ——总径流(mm)。

2 模型验证

2.1 研究区概况

本文分别将北京市密云县蛇鱼川小流域和房山区漫水河测站以上流域选取多次降雨和径流的实测资料,应用与基于垂向混合产流模型的北京山区山洪预警模型,检验其准确性。

蛇鱼川小流域位于北京的东北部,115°25′—117°30′E,39°28′—41°05′N,该流域地处密云水库上游白河水系一级支流蛇鱼川河所形成的流域,流域径流直接进入密云水库,集水面积25.86 km²,干流总长18.55 km,河道宽10~40 m^[11-13]。蛇鱼川小流域的降雨和流量资料采用黄峪口断面所测数据。根据堰流公式的得到,黄峪口断面的漫滩流量为6.38 m³/s。

漫水河测站以上流域位于北京市房山区北部的大石河上游,发源于北京市房山区境内,属拒马河支流,控制站为漫水河站,控制面积647.53 km²,大石河流经该区9个乡镇。

2.2 数据获取

在蛇鱼川小流域采用2011年8月14日和2012年9月1日的流量及降雨实测资料对北京山区山洪预警模型进行应用和检验。对于漫水河流域的验证,则应用的是1973年8月21日和2012年7月21日的流量及降雨实测资料。流量资料主要通过水文站监测到的历史数据获得,而降雨资料由雨量站或中国气象科学数据共享服务网提供。其他基础资料,如流域面积、沟道长和稳渗速率等,则通过野外调查以及由GIS 10.2处理获得。

2.3 验证结果与分析

现今气象部门可提供的最大精度的降雨预报为未来一段时间内以3 h为单位时段的降雨量。因此,为了提高验证结果的可信性和实用性,本文将精度较高的原始降雨数据转化为3 h降雨量后,再结合各流域的具体情况,根据不同的计算间隔处理降雨数据,继而输入模型进行验证。蛇鱼川小流域的数据资料源于黄峪口断面的水文站和雨量站,测站控制面积仅为10.91 km²,面积过小,故忽略河道汇流过程,并把计算间隔缩短为0.5 h。相比之下,漫水河小流域面积较大,采用3 h计算间隔。

蛇鱼川小流域和漫水河小流域的参数率定结果如表1所示。蛇鱼川小流域3场降雨以及漫水河小流域两场降雨产生的径流过程的实测结果和模拟结果见图2—5。5次洪水模拟误差及检验结果见表2—3。

表1 研究小流域预警模型参数率定结果

参数	参数取值	
	蛇鱼川小流域	漫水河小流域
W_M /mm	230.00	230.00
W_{MM} /mm	260.00	260.00
K_C /(mm·h ⁻¹)	8.10	7.20
K_F	9.50	9.50
B_F	0.20	0.10
B	0.13	0.13
K_g /h	228.00	228.00
k /h	6.00	0.50
x	0.25	0.25

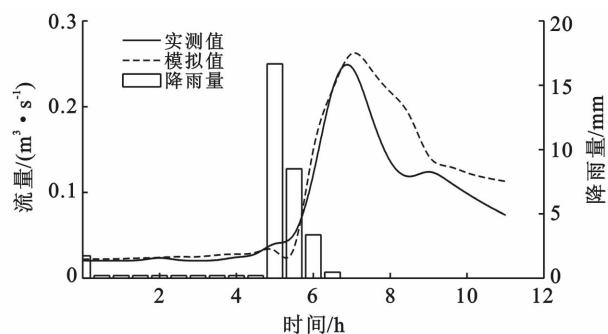


图2 蛇鱼川小流域2011年8月14日实测和模拟洪水过程

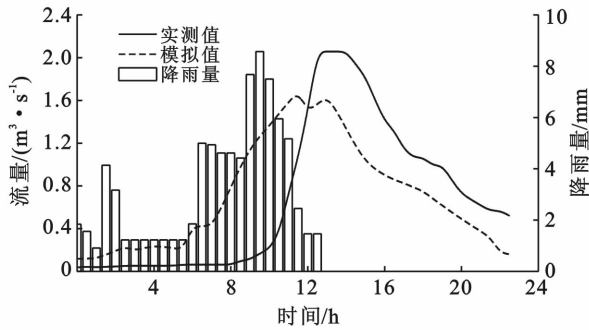


图 3 蛇鱼川小流域 2012 年 9 月 1 日实测和模拟洪水过程

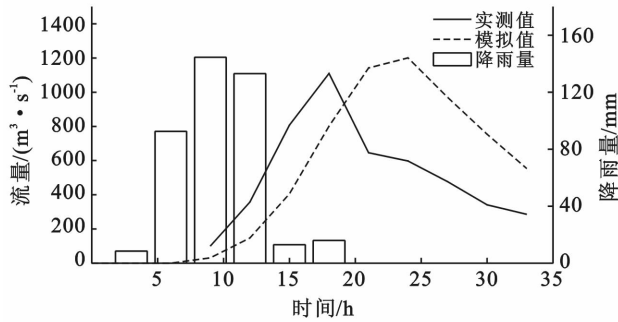


图 4 漫水河小流域 2012 年 7 月 21 日实测和模拟洪水过程

峰现时间在允许误差范围内,确定性系数和实效性系数属于较高等级,即可说明洪水过程的模拟情况较好,符合要求,保证了山洪预警的准确性。

由图 2—5 可定性分析洪水模拟结果。5 次降雨模拟出的洪水涨落的大趋势和洪峰流量与实测值是非常相近的,但是小范围内的小幅度涨落,本模型并没有完全模拟出来。模拟洪水过程比实际洪水过程均有滞后,开始阶段和结束阶段流量过小。同时,模拟值在起始阶段和最后阶段均小于真实值,变化过程不够平缓。但是,是否预警最重要的是比较洪峰流量和安全流量的大小,在洪峰流量拟合度很高的情况下,过程上的误差在一定程度上可以予以忽略。

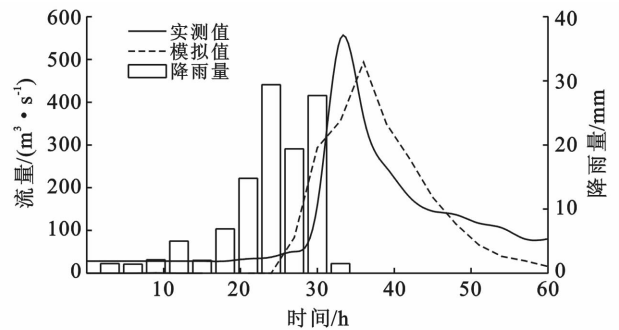


图 5 漫水河小流域 1973 年 8 月 21 日实测和模拟洪水过程

根据《水文情报预报规范(洪水预报)》(GB22482-2008-T),在洪水过程模拟的验证中,洪峰流量和

表 2 蛇鱼川小流域模型模拟结果

日期	降雨量/ mm	洪峰流量				确定性 系数	峰现时间 误差/h	时效 等级	是否发生 山洪	检验 结果
		实测值/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	模拟值/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	绝对误差/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	相对误差/ %					
20110814	31.3	0.26	0.27	-0.01	3.85	0.81	0	超前	否	合格
20120901	97.6	1.68	2.45	-0.77	-18.4	0.58	6	超前	否	合格

表 3 漫水河小流域模型模拟结果

日期	降雨量/ mm	洪峰流量				确定性 系数	峰现时间 误差/h	时效 等级	是否发生 山洪	检验 结果
		实测值/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	模拟值/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	绝对误差/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	相对误差/ %					
19730821	111.7	549	493	56	10.20	0.63	3	超前	是	合格
20120721	407.5	1 110	1 201	-91	-8.20	0.65	1	超前	是	合格

由表 2—3 可定量分析洪水模拟结果以及预警的准确性。由水文情报预报规范可知,洪峰流量的允许相对误差为 $\pm 20\%$,本模型模拟出的蛇鱼川小流域洪峰流量的相对误差在 $-18.4\% \sim 3.85\%$ 范围内,漫水河小流域则在 $-8.2\% \sim 10.2\%$ 范围内,均小于允许相对误差范围。峰现时间的允许误差范围为预报根据时间至实测洪峰出现时间之间时距的 30% ,两流域共 5 次洪水模拟结果中的峰现时间的绝对误差均在允许误差范围之内。在山洪预报中,最重要的就是洪峰流量,当洪峰流量高于安全流量时,则预警,当洪

峰流量低于安全流量时,则无需预警。若洪峰流量计算存在较大误差,就有可能错误预警,造成不必要的损失。

本模型中应用漫滩流量作为安全流量,科学性和准确性较高,是否预警的模拟结果符合历史实际情况。由此,通过上述的一系列验证,本文构建的北京山区山洪预警模型模拟出的洪峰流量、洪水过程的准确性符合要求,模拟结果可信,结合安全流量后,可以较为精确的判断一段时间的降雨情况是否会导致山洪灾害的发生。

3 讨论与结论

国内现有的山洪预警研究多集中于以下2个方面:第一,是时间预报技术,建立山洪预警系统,通过降雨等资料的输入,预测山洪发生的可能性和时间;第二,是空间预报技术,通过以综合指数法为例的多种方法,对山洪可能发生的范围进行划分,并对山洪沟道的危险程度进行评级。前者在国内的研究多集中在预警系统的结构和原理上,但针对具体地区,对系统内部水文模型的选择以及应用效果的研究较少,而本文填补了这方面的空缺。随着水文模型研究的发展,国内外学者不断地提出了适宜不同条件的水文模型以及各种模型的优化,精准度在逐步提高,因此本系统未来仍有一定的提升空间,山洪预警结果的准确性会得到更大的提高,同时可以在一定程度上降低错误预警的可能性并避免错误预警后造成的不必要的经济损失。

根据北京山区的具体情况,本文选择了适宜的产流和汇流模型,以及恰当的安全流量计算方法,因地制宜地构建了基于垂向混合产流模型的北京山区山洪预警模型。经过2个小流域5次历史降雨—流量资料的验证,表明由本研究构建的北京山区山洪预警模型对洪水过程的模拟结果均在允许误差范围之内,因此,本模型可以根据降雨资料较好地模拟出洪水过程曲线。模型出的是否会发生山洪的预测结果,与实际的历史情况相一致,表明了本模型预警的准确性。综上所述,本文建立的北京山区山洪预警模型,经过历史降雨—流量数据的验证,说明本模型具有符合要求的准确度,可以将其应用于北京山区的山洪预警,进行进一步的检验。

(上接第352页)

- [17] 戴照福,王继增,程炯,等. 流溪河流域菜地土壤磷素特征及流失风险分析[J]. 广东农业科学, 2006(4): 82-84.
- [18] 曹志洪,李庆逵. 黄土性土壤对磷的吸附与解吸[J]. 土壤学报, 1988, 25(3): 218-226.
- [19] 马良,徐仁扣. pH和添加有机物料对3种酸性土壤中磷吸附—解吸的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(6): 596-599.
- [20] Yuan T L. Adsorption of phosphate and water extractable soil organic material by synthetic aluminum silicates and acid soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 951-955.

[参 考 文 献]

- [1] Georgakakos K P. Analytical results for operational flash flood guidance[J]. Journal of Hydrology, 2006, 317(1/2): 81-103.
- [2] 刘志雨. 山洪预警预报技术研究与应用[J]. 中国防汛抗旱, 2012, 22(2): 41-45.
- [3] 胡维忠,叶秋萍,陈桂亚,等. 构建科学的山洪灾害监测预警系统[J]. 中国水利, 2007(14): 34-37.
- [4] 孙加龙. 省级山洪灾害预警监测系统的开发[J]. 中国防汛抗旱, 2012, 22(1): 34-36.
- [5] 崔泰昌,陆建华. 试论蓄满产流模型与超渗产流模型[J]. 山西水利科技, 2000(3): 13-15.
- [6] 瞿思敏,包为民,张明,等. 新安江模型与垂向混合产流模型比较[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2003(4): 374-377.
- [7] 田文苓. 混合产流模型及其应用[J]. 海河水利, 1996(2): 7-10.
- [8] 包为民,王从良. 垂向混合产流模型及应用[J]. 水文, 1997(3): 18-21.
- [9] 王贵作,任立良. 基于栅格垂向混合产流机制的分布式水文模型[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2009, 37(4): 386-390.
- [10] 王庆平,沈国华,王红艳. 垂向混合产流模型在不同地区的应用与改进[J]. 节水灌溉, 2012(5): 11-15.
- [11] 吴敬东,张洪江,段淑怀,等. 密云县蛇鱼川小流域地表水水质变化的规律[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(1): 46-52.
- [12] 吴敬东,叶芝菡,梁延丽,等. 密云水库上游蛇鱼川生态清洁小流域监测与评价[C]//2008年中国水土保持学会小流域综合治理与新农村建设研讨会, 2008.
- [13] 吴敬东,段淑怀,叶芝菡,等. 蛇鱼川生态清洁小流域水生态环境监测布设研究[J]. 水土保持通报, 2009, 29(2): 70-72.
- [21] 王永,徐仁扣. 可变电荷土壤对水体中磷酸根的吸附去除作用[J]. 生态与农村环境学报, 2008, 24(4): 63-67.
- [22] 赵晓齐,鲁如坤. 有机肥对土壤磷素吸附的影响[J]. 土壤学报, 1991, 28(1): 7-13.
- [23] 刘子国,黄敏,余萃,等. 武汉市郊典型利用方式下土壤磷素特征及流失风险分析[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(5): 71-74.
- [24] 张国林,钟继洪,曾芳,等. 土壤磷素的流失风险研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(5): 1917-1923.
- [25] 高秀美,汪吉东,刘兆普,等. 集约化蔬菜地土壤磷素累积特征及流失风险[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(1): 82-86.