

东北地区春季融雪期非点源污染负荷估算方法及应用

汪太明¹, 王业耀^{1*}, 刘玉萍², 香宝³, 马广文³, 胡钰³

(1.中国环境监测总站, 北京 100012; 2.黑龙江省环境保护科学研究院, 哈尔滨 150056; 3.国家环境保护区域生态过程与功能评估重点实验室, 北京 100012)

摘要:针对我国东北地区春季融雪期非点源污染的形成特点,提出了基于现场监测的径流浓度法估算春季融雪期非点源污染。该方法主要包括监测频次确定、监测点位布设、现场监测、融雪径流计算、非点源污染产生量估算、典型子流域入河系数估算和非点源污染入河量估算等7个过程。其中,监测点布设于不同土地利用类型的平均坡度与该种土地利用类型的主要土壤类型重合的区域,监测频次通过分析融雪过程和融雪径流特征确定。将该方法应用于东北地区的阿什河流域,计算出春季融雪期阿什河流域非点源污染 COD 的产生量为 1 637.03 t,入河量为 151.11 t。

关键词:融雪径流;非点源;估算;监测

中图分类号:X522 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)04-0807-06

Study and Application of Estimation Method for Spring Non-point Source Pollution in Northeast China

WANG Tai-ming¹, WANG Ye-yao^{1*}, LIU Yu-ping², XIANG Bao³, MA Guang-wen³, HU Yu³

(1. China National Environmental Monitoring Centre, Beijing 100012, China; 2. Heilongjiang Provincial Research Institute of Environmental Sciences, Harbin 150056, China; 3. State Environment Protection Key Laboratory of Regional Eco-process and Function Assessment, Beijing 100012, China)

Abstract: Non-point source pollution (NSP) can be caused by spring snowmelt runoff in mid-latitude climatic regions (30°~60°), including Northeast China. In view of the NSP formation characteristics in the spring snowmelt period in the Northeast China, the study proposed an estimation method to calculate the NSP output loads based on field-monitoring and calculate the export loads based on the ratio of export loads in the period. This method had seven processes including monitoring frequency determination, monitoring site arrangement, in-situ monitoring, snowmelt runoff simulation, NSP output load estimation, export coefficient estimation of the typical sub-watershed and the estimation of NSP export loads. In the implementation of the method, the monitoring sites of different land use types were located in the overlapped areas of the main soil type and the average slope. The monitoring frequency was determined by the analysis of snowmelt process and the characteristics of snowmelt runoff. Runoff in spring was calculated by mechanism model. The ratio of export loads was the quotient, dividing output loads by export loads of NSP in typical sub-watershed. Based on the application of this method in the Ashihe watershed in Northeast China, the NSP output loads of COD was 1 637.03 t and the NSP export loads of COD was 151.11 t during the snowmelt period in spring.

Keywords: snowmelt runoff; non-point source pollution; estimation; monitoring

非点源污染 (Non-point source pollution, NSP)是指溶解性或固体污染物在大面积降水和径流的淋溶和冲刷作用下,汇入受纳水体引起的污染^[1],主要包括农业源、水土流失、城市径流,以及农村生活污水和径

流。美国 EPA 研究表明,农业活动已经成为河流污染的主要来源 (US EPA 2002)^[2]。在我国,根据第一次污染源普查统计,仅农业源排放的污染物就占 COD 排放总量的 43.7%,占 TN、TP 排放总量分别为 57.2%和 67.4%。近年来,随着点源污染总量不断削减,非点源污染引起人们的广泛关注,并开展了大量研究^[3-6]。在我国东北地区,春季融雪产生的径流量在年平均径流量中占较大的比例,如松花江流域春季融雪期平均径流量占多年平均年径流总量的 19.85%,春季融雪期

收稿日期:2011-07-21

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07207-011);
财政部改革启动专项(GGQD2008-04)

作者简介:汪太明(1978—),男,黑龙江安达人,博士研究生,工程师,
主要从事非点源污染研究。E-mail:wtm97@163.com

* 通讯作者:王业耀 E-mail:wangyy@craes.org.cn

输沙量占多年平均年输沙总量的 12.24%^[7]。春季融雪期径流造成的非点源污染成为东北地区河流水体污染的重要来源。

非点源污染的估算方法主要包括经验模型和机理模型两种^[8]。机理模型由影响非点源污染产生的径流过程、侵蚀和泥沙输移过程、污染物迁移转化过程等经模型化集合而成,如 SWAT 模型、AGNPS 模型等,这些模型考虑非点源发生内在机制和中间过程,可全面反映产生量和入河量,但对数据量和精度要求高。经验模型一般包括输出系数法、径流分割法和径流浓度法^[9-12],参数要求低,模拟精度也较低。机理模型对于非点源污染估算有很大优越性,是研究的主流方向,然而在我国由于缺乏系统性研究,机理模型中诸多参数难以准确表征和确定,特别是由于春季融雪期非点源污染产生过程的研究不足,影响了机理模型在我国东北地区的应用。

与其他季节相比,春季融雪期非点源污染具有以下特点:(1)由于没有农业活动,水土流失和地表径流冲刷是春季非点源污染的主要来源;(2)春季融雪径流是区域冬季降雪集中、连续融化过程,与一次降雨相近;(3)冬季积累于地表的污染物,通过融雪径流大量进入水体,秋冬季节和春季冻融交替作用也会降低土壤抗蚀性能、增加土壤中污染物质的溶出,造成径流中污染物含量较高^[13-14]。基于以上分析,本文确定了基于现场监测的春季融雪期非点源污染估算方法,提出了监测点位、监测频率的确定方法,并将该方法应用于阿什河流域,为东北地区春季融雪期非点源污染负荷估算提供参考。

1 材料与方法

1.1 春季融雪期非点源污染现场监测

春季融雪期非点源污染估算方法主要包括监测频次确定、监测点位布设、污染物现场监测、融雪径流计算、非点源污染产生量估算、典型子流域入河系数估算和非点源污染入河量估算等 7 个过程(图 1)。其中,现场监测包括污染源监测和典型子流域出口的河流水环境监测两部分,前者主要用于估算非点源污染产生量,后者主要用于计算非点源污染的入河系数。

1.1.1 污染源与河流水环境监测指标和点位布设

污染源监测和河流水环境监测的指标为 COD,测试方法参见《水和废水监测分析方法(第四版)》^[15]。

地形、土壤理化性质、土地利用类型是影响非点源污染产生的主要因素^[16]。不同土地利用类型径流浓

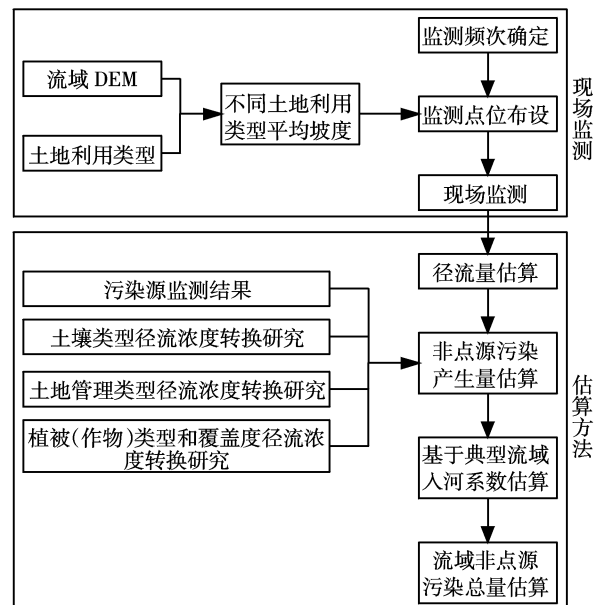


图 1 基于现场监测的春季融雪期非点源污染估算方法

Figure 1 Estimation method for NSP of spring snowmelt based on monitoring

度差异较大,每种土地利用类型均需布设监测点位。坡度是影响地形因子的主要指标,流域坡度范围通常较广,无法监测每一个坡度的径流浓度,因此将监测点位布设在平均坡度处。不同土壤类型的径流浓度可以通过土壤有机质、氮、磷含量类比确定。基于以上分析,监测点位布设在不同土地利用类型的平均坡度和该种土地利用类型的主要土壤类型重合的区域。将流域土壤类型与流域土地利用类型叠加,确定流域内不同土地利用类型的主要土壤类型,并将流域地形与流域土地利用类型叠加,计算出流域内不同土地利用类型的平均坡度。并结合实地调查,确定监测点位。河流水环境监测断面布设于典型子流域的出口处。

1.1.2 污染源与河流水环境监测频次确定

径流冲刷是春季非点源污染的主要来源,污染源监测时,采样时间分别为融雪初期、融雪高峰期和融雪末期。污染源监测点所辖的流域范围通常小于 1 km²,在小范围内从融雪径流产生到融雪径流结束通常持续 1 周左右。因此,春季融雪期非点源污染源监测次数为 3 次,每 2 d 监测 1 次。

坡向、植被覆盖、海拔高度、纬度差异等因素都会影响融雪时间,流域内这些因素通常复杂多样,融雪径流时间跨度较大。研究流域的融雪期通常为 4 周,但是最后 1 周只有海拔较高地区仍存在零星积雪,因此春季融雪期河流水环境监测的次数为 3 次,每周监测 1 次。

1.2 春季融雪期非点源污染估算

春季融雪期非点源污染的估算过程见图1,主要包括融雪径流估算、非点源污染产生量估算、入河系数估算和非点源污染入河量估算。

1.2.1 融雪径流与非点源污染产生量估算

采用机理模型模拟的方法,估算不同土地利用类型的融雪径流产生量。估算非点源污染时,首先应确定采样点土壤类型与其他土壤类型融雪径流中各污染指标浓度转换系数,确定采样点植被(作物)类型和覆盖度与其他植被(作物)类型和覆盖度融雪径流中各污染指标浓度转换系数,确定采样点的土地管理类型与其他土地管理类型融雪径流中各污染指标浓度转换系数。以上各种系数确定后,利用公式(1)估算融雪期非点源污染的产生量。

$$W = \sum_{i=1}^n \cdot C_i \cdot Q_i \sum_{j=1}^{m1} \sum_{k=1}^{m2} \sum_{r=1}^{m3} \psi_{ijkr} \cdot m_{ijkr} \times 10^{-6} \quad (1)$$

式中:

W —流域融雪径流非点源污染产生量,t;

C_i —第*i*种土地利用类型融雪径流污染物平均浓度,mg·L⁻¹;

Q_i —第*i*种土地利用类型融雪径流量,m³;

ψ_{ijkr} —第*i*种土地利用类型、第*j*种土壤类型、第*k*种植被(作物)类型和覆盖度、第*r*种土地管理类型与第*i*种土地利用类型采样点的土壤类型、植被(作物)类型和覆盖度、土地管理类型之间的径流浓度转换关系,无量纲;

m_{ijkr} —第*i*种土地利用类型、第*j*种土壤类型、第*k*种植被(作物)类型和覆盖度、第*r*种土地管理类型的面积与第*i*种土地利用类型总面积之比,无量纲;

i —土地利用类型的序列号。

1.2.2 入河系数确定

入河系数估算的步骤是:选取典型子流域;子流域出口径流量和污染物浓度监测,以及污染物通量计算;利用公式(1)计算典型子流域非点源污染产生量;利用公式(2)计算春季融雪期非点源污染入河系数。

$$\lambda = \frac{L_{sub}}{S_{sub}} \quad (2)$$

式中: λ —典型子流域入河系数,无量纲;

L_{sub} —典型子流域出口非点源污染通量,t;

S_{sub} —典型子流域非点源污染产生量,t。

1.2.3 非点源污染入河量估算

采用公式(3)估算流域春季融雪期非点源入河量。

$$M_{入河量} = \sum \lambda \cdot M_{产生量,i} \cdot e^{-k \cdot D_i \cdot 1.05^{T-20}} \quad (3)$$

式中: $M_{入河量}$ —流域出口非点源污染总量,t;

$M_{产生量,i}$ —第*i*个子流域非点源污染产生量,t;

λ —典型子流域的入河系数,无量纲;

k —一阶距离消减系数,km⁻¹;

D_i —第*i*个子流域出口到流域出口的距离,km;

T —平均温度,℃。

1.3 研究区域概况及主要数据来源

选择东北地区的阿什河流域作为研究对象,阿什河位于黑龙江省南部,是松花江干流南岸支流,发源于大青山南麓,自东向西流经黑龙江省五常市、哈尔滨市,全长213 km,流域面积3 581 km²。流域冬季气候寒冷,每年11月中旬至翌年3月上旬为结冰期,降水形式是雪。春季雪融化较快,土壤解冻慢,径流不下渗,产生较强烈的春季融雪径流。

本文地形数据来源于国家基础地理信息中心 1:10 万地形数据,土地利用数据和土壤类型数据分别来源于中国科学院地理科学与资源研究所 1:25 万土地利用矢量数据和 1:100 万土壤类型矢量数据。

2 结果与讨论

2.1 结果

2.1.1 污染源与河流水环境现场监测

阿什河流域主要土地利用类型包括农村居民地、旱田、水田、森林、草地(图2),流域地形见图3,利用ArcGIS软件计算不同土地利用的平均坡度见表1。结合流域现场调查,选择表1中平均坡度对应的旱田、

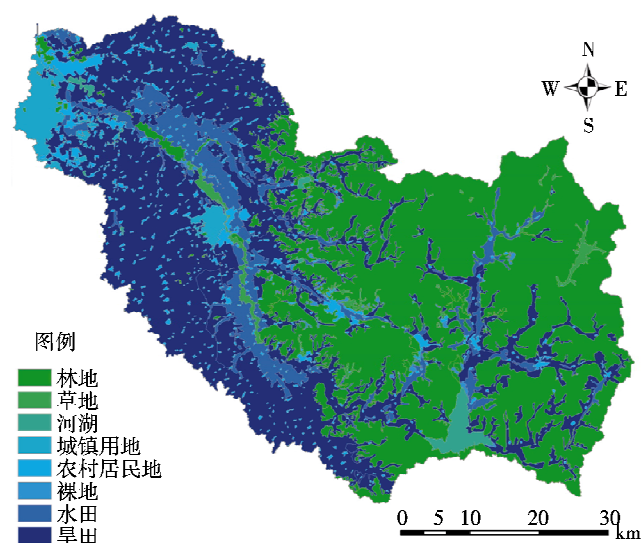


图2 阿什河流域土地利用类型

Figure 2 Land use types of Ashihe watershed

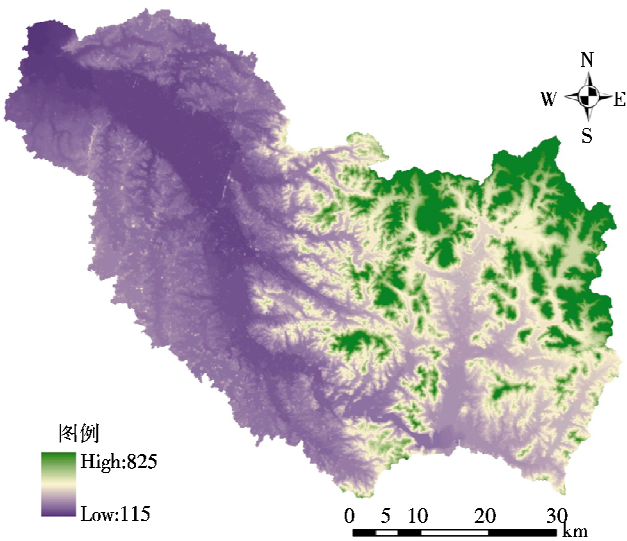


图3 阿什河流域地形
Figure 3 DEM of Ashihe watershed

表 1 流域不同土地利用类型的平均坡度
Table 1 The average slopes of different land use types in
Ashihe watershed

序号	土地利用类型	面积/km ²	平均坡度	土地利用类型 占流域比例/%
1	农村居民地	174.04	2.65°	4.86
2	旱田	1 328.91	3.89°	37.11
3	水田	278.24	0.00°	7.77
4	森林	1 598.92	10.57°	44.65
5	草地	47.27	4.75°	1.32
6	城市用地	91.32	2.17°	2.55
7	湖泊河流	41.90	0.00°	1.17
8	其他	20.05	6.48°	0.56

注:水田和湖泊河流平均坡度是修正值。

水田、森林、草地和农村居民地 5 个地块作为采样点(图 4),5 个采样点的土壤类型分别为黑土、水稻土、暗棕壤、草甸土和黑土。

受水文资料限制,选择位于哈尔滨市阿城区附近的阿城水文站以上流域作为典型子流域,计算非点源入河系数,典型子流域面积为 2 314 km²(图 5),为了避免阿城区城市径流和点源对监测结果的影响,典型子流域出口的河流水环境监测点布设在阿城区上游哈阿高速与阿什河交接处,该点距阿城水文站约 4 km(图 4)。污染源监测结果和河流水环境监测结果分别见表 2 和表 3。

2.1.2 春季融雪期非点源污染负荷估算结果

2.1.2.1 融雪径流量

利用 SWAT2005 模拟春季融雪径流产生量,模

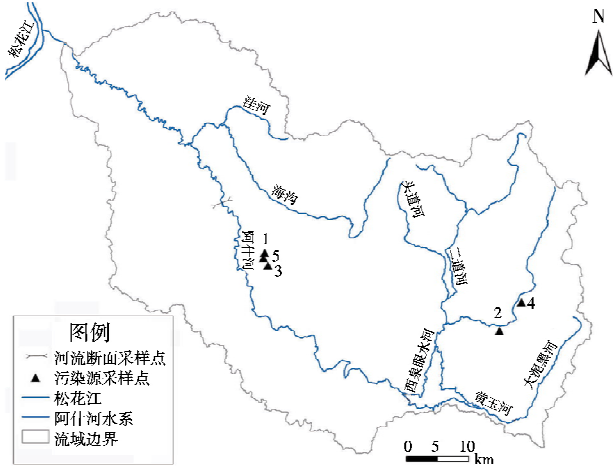


图4 监测点位布设图
Figure 4 Monitoring sites in Ashihe watershed

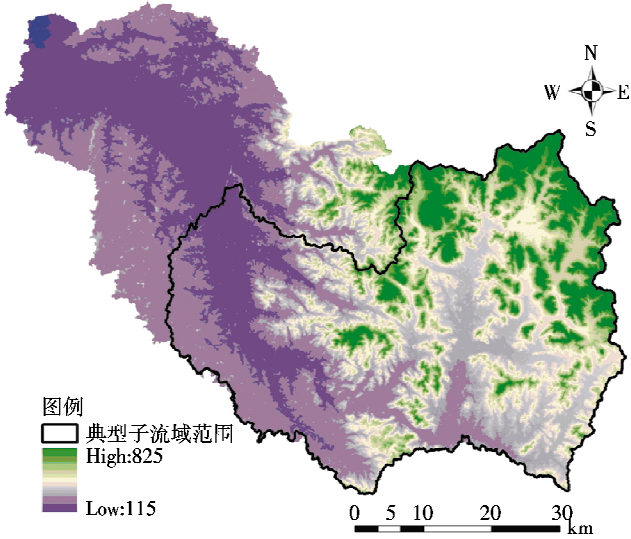


图5 典型子流域的流域范围
Figure 5 Typical sub-watershed in Ashihe watershed

表 2 污染源监测结果
Table 2 Monitoring results of pollution sources

土地利用类型	旱田	水田	草地	森林地	农村居民地
COD/mg·L ⁻¹	17.49	10.99	15.91	18.26	322.91

表 3 河流水环境监测结果

Table 3 Monitoring results of water quality in Ashihe river				
	融雪径流初期	融雪径流中期	融雪径流末期	均值
COD/mg·L ⁻¹	9.37	10.28	6.40	8.68

型参数根据参考文献[17]确定。模拟结果显示,阿什河流域融雪径流产生量为 5.3×10⁷ m³,其中旱田、水田、草地、森林地和农村居民地的融雪径流产生量分别为 19.63×10⁶、4.11×10⁶、0.70×10⁶、23.62×10⁶ m³ 和 2.57×

10^6 m^3 。

2.1.2.2 非点源污染产生量

忽略不同林地和不同草地植被类型和覆盖度之间的差异,忽略旱田不同种植作物之间的差异,忽略不同土地管理类型之间的差异,也即公式(1)中 ψ_{ijk} 和 m_{ijk} 均由土壤类型决定。农村居民地的 $\psi_{ijk} \cdot m_{ijk} = 1$, 根据土壤中有有机质的含量^[18-19],以及不同土地利用类型中不同土壤类型所占的比例,计算出旱田、水田、森林和草地不同土壤类型的 $\psi_{ijk} \cdot m_{ijk}$ 见表 4。

表 4 旱田、水田、森林和草地的 $\psi_{ijk} \cdot m_{ijk}$

Table 4 $\psi_{ijk} \cdot m_{ijk}$ of dry farmland, paddy field, forest and grassland

土地利用类型	旱田	水田	森林	草地
$\psi_{ijk} \cdot m_{ijk}$ (转换系数)	0.96	1.39	0.93	1.20

应用表 4 中的转换系数、表 2 中污染源监测结果和径流量估算结果,采用公式(1)估算融雪径流非点源污染 COD 的产生量见表 5。

表 5 流域非点源污染 COD 产生量

Table 5 Output loads of NSP in Ashihe watershed

土地利用类型	旱田	水田	草地	森林地	农村居民地	合计
COD/t	329.62	62.79	13.33	401.11	830.18	1 637.03

2.1.2.3 入河系数确定

典型子流域内工业点源较少,污染主要来源于非点源。春季融雪期,阿城水文站由融雪径流带来的径流量约 $7.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。根据融雪径流量和表 3 的监测结果,可以估算出断面由融雪径流引起非点源污染 COD 入河量约为 96.15 t。

利用 SWAT2005 模拟典型子流域春季融雪径流产生量为 $3.7 \times 10^7 \text{ m}^3$,其中旱田、水田、草地、森林地和农村居民地的融雪径流量分别为 9.77×10^6 、 2.46×10^6 、 0.61×10^6 、 $21.97 \times 10^6 \text{ m}^3$ 和 $1.41 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。利用公式(1)和表 2 的监测结果可以估算典型子流域非点源污染 COD 产生量为 1 041.61 t。利用公式(2)估算非点源污染 COD 的入河系数为 0.09。

2.1.2.4 流域入河总量

由于典型子流域约占整个阿什河流域面积 58%,因此求得的入河系数是包括降解过程的综合入河系数,采用公式(3)计算阿什河流域春季融雪期非点源污染入河量时,忽略距离消减系数 k 值。阿什河流域春季非点源污染 COD 入河量为 151.11 t。

2.2 讨论

东北地区尚未开展融雪期河流水环境质量监测

工作,致使建立的方法无法得到验证。为了全面掌握春季融雪期非点源污染的状况,建议在东北地区点源污染影响较小的区域,增设专门针对非点源污染的河流水环境自动监测站。

3 结论

本文提出采用基于现场监测的径流浓度法估算春季融雪期非点源污染,该方法主要包括监测频次确定、监测点位布设、现场监测、融雪径流计算、非点源污染产生量估算、典型子流域入河系数估算和非点源污染入河量估算等 7 个过程。提出了径流污染物监测布点与监测频次的确定方法。以阿什河流域为例进行了现场监测和估算,结果显示,春季融雪期阿什河流域非点源污染 COD 的产生量为 1 637.03 t,入河量为 151.11 t。

参考文献:

- [1] William F R, Shirmohammadi A. Agricultural nonpoint source pollution [M]. CRC Press LLC, Boca Raton London New York Washington, D. C, 2001.
- [2] Michelle A Gray. Assessing non-point source pollution in agricultural regions of the upper St. John River basin using the slimy sculpin (*Cottus cognatus*) [R]. New Brunswick: The University of New Brunswick, 2003.
- [3] HAN Long-xi, HUO Fei, SUN Juan. Method for calculating non-point source pollution distribution in plain rivers [J]. *Water Science and Engineering*, 2011, 4(1): 83-91.
- [4] 应兰兰, 侯西勇, 路 晓, 等. 我国非点源污染研究中输出系数问题 [J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(6): 90-95, 96.
YING Lan-lan, HOU Xi-yong, LU Xiao, et al. Discussion on the export coefficient method in non-point source pollution studies in China [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2010, 21(6): 90-95, 96.
- [5] 朱 梅, 吴敬学, 张希三. 海河流域种植业非点源污染负荷量估算 [J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(10): 1907-1915.
ZHU Mei, WU Jing-xue, ZHANG Xi-san. Estimation on non-point source pollution loads of crop farming in Hai Basin [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(10): 1907-1915.
- [6] 李家科, 李怀恩, 董 雯, 等. 渭河关中段典型支流非点源污染监测与负荷估算 [J]. 环境科学学报, 2011, 31(7): 1470-1478.
LI Jia-ke, LI Huai-en, DONG Wen, et al. Monitoring and load estimation of non-point source pollution on typical tributaries in the Guanzhong reach of the Weihe River [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(7): 1470-1478.
- [7] 焦 剑, 谢 云, 林 燕, 等. 东北地区融雪期径流及产沙特征分析 [J]. 地理研究, 2009, 28(2): 333-344.
JIAO Jian, XIE Yun, LIN Yan, et al. Study on snowmelt runoff and sediment yields in Northeast China [J]. *Geographical Research*, 2009, 28(2): 333-344.

- [8] 胡雪涛, 陈吉宁, 张天柱. 非点源污染模型研究 [J]. 环境科学, 2002, 23(3): 124-128.
HU Xue-tao, CHEN Ji-ning, ZHANG Tian-zhu. A study on non-point source pollution models[J]. *Environmental Science*, 2002, 23(3): 124-128.
- [9] 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: 123.
LI Huai-en, SHEN Jin. NSP mathematical model[M]. Xi'an: Northwest-ern Polytechnical University Press, 1996: 123.
- [10] 蔡 明, 李怀恩, 庄咏涛, 等. 改进的输出系数法在流域非点源污染负荷估算中的应用[J]. 水利学报, 2004(7): 1-8.
CAI Ming, LI Huai-en, ZHUANG Yong-tao, et al. Application of modified export coefficient method in polluting load estimation of non-point source pollution[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004(7): 1-8.
- [11] 李兆富, 杨桂山, 李恒鹏. 基于改进输出系数模型的流域营养盐输出估算[J]. 环境科学, 2009, 30(3): 668-672.
LI Zhao-fu, YANG Gui-shan, LI Heng-peng. Estimated nutrient export loads based on improved export coefficient model in Xitiaoxi Watershed[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(3): 668-672.
- [12] 陈友媛, 惠二青, 金春姬, 等. 非点源污染负荷的水文估算方法[J]. 环境科学研究, 2003, 16(1): 10-13.
CHEN You-yuan, HUI Er-qing, JIN Chun-ji, et al. A hydrological method for estimation of non-point source pollution loads and its application[J]. *Research of Environmental Science*, 2003, 16(1): 10-13.
- [13] Fitzhugh R D, Driscoll C T, Groffman P M, et al. Effects of soil freezing disturbance on soil solution nitrogen, phosphorus, and carbon chemistry in a northern hardwood ecosystem[J]. *Biogeochemistry*, 2001, 56: 215-238.
- [14] Joseph G, Henry H A L. Soil nitrogen leaching losses in response to freeze-thaw cycles and pulsed warming in a temperate old field[J]. *Soil Biology Biochemistry*, 2008, 40(7): 1947-1953.
- [15] 魏复盛. 水和废水监测分析方法[M]. 第四版(增补版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 261.
WEI Fu-sheng. Determination methods for examination of water and wastewater[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 261.
- [16] 杨丽霞, 杨桂山, 苑韶峰, 等. 影响土壤氮素径流流失的因素探析[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(6): 190-194.
YANG Li-xia, YANG Gui-shan, YUAN Shao-feng, et al. Analysis of the factors affecting soil nitrogen loss through runoff[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(6): 190-194.
- [17] 冯夏清, 章光新, 尹雄锐. 基于 SWAT 模型的乌裕尔河流域气候变化的水文响应[J]. 地理科学进展, 2010, 29(7): 827-832.
FENG Xia-qing, ZHANG Guang-xin, YIN Xiong-rui. Study on the hydrological response to climate change in Wuyur River Basin Based on the SWAT Model[J]. *Progress in Geography*, 2010, 29(7): 827-832.
- [18] 黑龙江省土地管理局, 黑龙江省土壤普查办公室. 黑龙江土壤[M]. 北京: 农业出版社, 1992: 91, 149.
Heilongjiang Provincial Bureau of Land Administration. Soil of Heilongjiang province[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1992: 91, 149.
- [19] 沈善敏. 中国土壤肥力[M]. 北京: 农业出版社, 1998: 38.
SHEN Shan-min. Soil fertility of China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998: 38.