

昆明市云龙水库径流区氮磷非点源污染负荷分析

郝旭, 张乃明, 史静

(云南农业大学 资源与环境学院, 云南 昆明 650201)

摘要: 云龙水库是昆明市最大的城市集中式饮用水源地。水源区农业非点源污染是影响水库水质的主要来源, 因此分析水库径流区氮磷非点源污染负荷与来源构成, 可为饮用水源地水质保护提供科学依据。采用输出系数模型法, 对昆明市云龙水库径流区氮、磷负荷的产生量与入库量进行了估算。结果表明: (1) 云龙水库径流区氮、磷非点源污染负荷产生量分别为 2 079.8 和 454.32 t/a, 入库量分别为 207.98 和 24.73 t/a。(2) 从不同乡镇分析, 撒营盘镇的氮、磷负荷产生量最高, 云龙乡和茂山镇产出量较低, 其余乡镇产生量相近。(3) 从不同污染源类型分析, 该区非点源污染的主要污染源为农村生活污染和畜禽粪便污染。

关键词: 非点源污染; 输出系数模型; 负荷; 云龙水库

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)06-0274-05

中图分类号: X52

An Analysis of Non-point Pollution Loads in Yunlong Reservoir Runoff Field of Kunming City

HAO Xu, ZHANG Nai-ming, SHI Jing

(College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650201, China)

Abstract: It is important to find out the load and source for the non-point source pollution about nitrogen and phosphorus in the runoff field of Yunlong reservoir in order to provide a scientific basis to protect water quality. The nitrogen and phosphorus pollution loads in Yunlong reservoir runoff field were estimated according to the approach of export coefficient modeling. The results showed that: (1) The total nitrogen and total phosphorus loads of non-point source in Yunlong reservoir runoff field were 2 079.8 and 454.32 t/a respectively and the pollution loads in reservoir were 207.98 and 24.73 t/a respectively. (2) Nitrogen and phosphorus loads in Sayingpan town generated the highest volume, Yunlong and Maoshan town export were the lowest, and the remaining towns produced nearly. (3) The main pollutant sources were domestic pollutant and poultry excrement pollutant.

Keywords: non-point pollution; export coefficient model; pollution load; Yunlong reservoir

非点源污染的危害性随点源污染控制能力的提高而逐渐表现出来, 特别是当点源污染控制水平达到一定程度后, 非点源污染势必成为水环境污染的主要来源^[1]。从世界范围来看, 非点源污染已成为水环境污染的重要方式。美国 60% 的水环境污染起源于非点源^[2], 据计算奥地利北部地区进入水环境的非点源氮量比点源多, 丹麦 270 条河流 94% 的氮负荷, 52% 的磷负荷是由非点源污染引起的^[3], 荷兰农业非点源提供的总氮、总磷分别占水环境污染总量的 60% 和 40%~50%^[4]。在我国, 长江流域、云南洱海、北京密云水库等许多水域, 非点源污染比例均超过点源污染。在此背景下, 进行非点源污染的量化研究对水质

管理及饮用水源地保护显得愈发重要。

应用数学模型对非点源污染进行模拟和估算是研究非点源污染的重要手段。已有的非点源模型大都是针对小区域的精细模拟, 率定出的参数和结果带有较大的区域性, 很难适用于大中尺度流域的负荷估算。而输出系数模型法所需参数少, 操作简便易行, 又具有一定的精度, 且不考虑非点源污染发生和发展的复杂过程, 因此, 该模型在非点源污染负荷估算方面得到了一定的应用^[5-12]。

近几年, 西南地区水资源紧缺, 该区连续 3 a 大旱, 加之人类活动对昆明市云龙水库汇水范围内的生态环境的干预逐步加重, 导致水库汇水区生态和水

收稿日期: 2012-12-16

修回日期: 2013-03-24

资助项目: 云南省社会发展科技计划项目“云龙水库水源区面源污染控制关键技术研究示范”(2009CA026); 云南省教育厅重大项目(ZD2011001)

作者简介: 郝旭(1987—), 女(汉族), 河北省廊坊市人, 硕士研究生, 研究方向为环境保护。E-mail: 512653826@qq.com。

通信作者: 张乃明(1963—), 男(汉族), 山西长治市, 教授, 研究方向为土壤侵蚀与环境质量。E-mail: zhangnaiming@sina.com。

环境状况日益恶化。但就目前情况而言,对云龙水库库区的基本状况、基础数据的调查与收集还远远不够,对水库水质变化原因,污染来源与贡献,水环境容量及库区农业面源污染控制技术等都缺乏系统研究。因此,本研究利用输出系数模型,针对云龙水库水源保护区的氮、磷非点源污染负荷进行分析,为进一步掌握研究区的氮磷负荷特征和合理调整农业结构提供科学依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

云龙水库是昆明市最重要也是云南省最大的集中式饮用水源地。水库位于金沙江水系二级支流掌鸠河中上游禄劝县云龙乡,距昆明市约86 km,位于东经 $102^{\circ}16'$ — $102^{\circ}35'$,北纬 $25^{\circ}43'$ — $26^{\circ}07'$,属于北亚热带季风气候,多年平均气温 $10.2\sim 13.8^{\circ}\text{C}$ 。云龙水库控制径流面积为 745 km^2 ,流域呈矩形状,地势北高南低,流域平均海拔高程约为 $2\,406\text{ m}$ 。水库总库容 $4.84\times 10^8\text{ m}^3$,正常蓄水量 $3.97\times 10^8\text{ m}^3$,主要入库河流有石板河、老木河、水城河。云龙水库水源区总人口约53 601人,经济以农业为主。水源区实际耕地面积约 $2.27\times 10^4\text{ hm}^2$,林地面积 $4.82\times 10^4\text{ hm}^2$ 。全年牛、猪、羊、家禽等存栏数约21万头。水源区经济以农业为主,产业结构单一。

1.2 非点源输出模型及参数取值

输出系数模型是利用半分布式途径来计算某流域年均污染(总氮、总磷)总负荷的数学加权公式,其实质上是一种集总模型。根据非点源污染负荷产生量和土地利用类型之间的联系,利用流域相关数据直接建立流与非点源污染产出量的关系^[13],然后通过对不同来源污染负荷量求和,得到研究区域污染物总负荷。

Johnes 等的输出系数模型方程为:

$$L = \sum_{i=1}^n E_i [A_i (I_i)] \quad (1)$$

式中: L ——营养物质的总流失量; E_i ——第 i 种营养源的输出系数; A_i —— I_i 第 i 类土地利用类型的面积或畜禽数量或人口数量; I_i ——第 i 类营养源的营养物质输入量。

1.2.1 不同土地利用类型非点源负荷 不同土地利用类型产生的氮、磷非点源负荷计算式为:

$$L_i = \sum_j E_{ij} \cdot M_{ij} \cdot A_j \quad (2)$$

式中: j ——土地利用类型,共 n 种; E_{ij} ——第 i 种污染物在第 j 种土地利用类型单位面积的输出系数

$[\text{kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})]$; M_{ij} ——第 i 种污染物在第 j 种土地利用类型中的营养物输入量(kg); A_j ——第 j 种土地利用类型的面积(km^2)。

1.2.2 农村生活非点源负荷 农村生活污染源中,氮、磷非点源负荷的计算方法为:

$$L_{(\text{生活})i} = D_i \cdot H \cdot 365 \cdot M \cdot B \quad (3)$$

式中: $L_{(\text{生活})i}$ ——第 i 种农村生活污染物年输出量(kg/a); D_i ——第 i 种污染物的日输出系数 $[\text{kg}/(\text{人} \cdot \text{d})]$; H ——区域内人口数量(人); M ——污水处理过程中的机械去除营养物质系数; B ——污水处理过程中的生物去除营养物质系数。

1.2.3 畜牧养殖非点源负荷 畜禽污染源中氮、磷非点源负荷计算方法为:

$$L_{(\text{畜牧})i} = \sum_{j=1}^n D_{ij} \cdot H_j \cdot M \cdot B \quad (4)$$

式中: $L_{(\text{畜牧})i}$ ——第 i 种污染物年输出量(kg/a); D_{ij} ——第 j 种牲畜第 i 种污染物日输出系数 $[\text{kg}/(\text{头} \cdot \text{d})]$; H_j ——区域内第 j 种牲畜的数量(头); M ——污水处理过程中的机械去除营养物质系数; B ——污水处理过程中的生物去除营养物质系数。

1.2.4 输出系数取值的确定 大量的试验研究^[14]表明,影响输出系数的因素有地形、气候、水文、土地利用类型、植被覆盖率等,都会对输出系数产生较大的影响。输出系数多采用单位时间、单位面积上的负荷量表示。一般确定非点源污染物输出系数值可采用试验或调研的方法^[15]。鉴于无云南地区的输出系数试验数据,本研究计算所需的输出系数值,参考国外不同土地利用方式下的氮和磷输出系数的变化范围的研究成果和参照国内^[1,11,16-23]相似自然、气候条件下的其他地区研究结果并取其平均值作为云龙水库径流区的输出系数值。不同土地利用类型的参考输出系数值和本文的具体取值结果(表1);畜禽粪尿和农村生活部分的非点源污染物输出系数值均参照国家环保总局推荐的排泄系数和人口输出系数^[24],并参考前人研究成果得到农村生活及畜禽粪尿输出系数(表2)。畜禽粪尿的氮磷输出系数分别取为各自排泄系数的12%^[24]。而农村生活的输出系数则反映了当地农村人口对生活污水及垃圾的利用和处理水平。

估算非源污染负荷产生量所需的其它数据包括研究时段的土地利用或植被覆盖数据、人口数量以及大牲畜、猪、羊和家禽数量,可通过查阅云南省昆明市禄劝统计年鉴、云南省数字乡村网^[25]以及文献资料得到或实地调查获得。

表 1 不同土地利用类型的输出系数

(kg/(hm²·a))

研究区域	污染物类别	耕地			园地	林地	草地
		水田	旱地	菜地			
长江流域	TN	—	29.0~45.1	—	2.2~12.8	2.38~12.8	0.6~10.0
	TP		0.90		0.38	0.15	0.20
岗南、黄壁庄水库上游流域	TN	15.00	10.00	20.00	15.00	2.50	15.00
	TP	2.50	1.50	3.00	2.00	0.15	0.50
三峡库区	TN	15.00	—	—	—	2.50	6.00
	TP	2.30				0.15	1.80
汉江中下游地区	TN	26.37	18.35	9.36	11.92	6.79	11.50
	TP	2.00	4.08	3.74	2.46	1.53	1.55
北京地区	TN	—	20.20	—	9.01	4.38	6.26
	TP		2.06		1.31	0.35	0.68
日本琵琶湖	TN	—	27.84	—	—	6.0~94.0	—
	TP		0.36			0.19	
昆明云龙水库	TN	—	32.00	—	2.80	2.80	6.40
	TP		2.25		1.18	0.15	0.36

注：“—”表示该项无可利用的数据，下同；TN 和 TP 分别代表总氮和总磷。

表 2 农村生活及畜禽粪便输出系数

kg/(只·a)

研究区域	污染物类别	农村生活区	畜禽粪便			
			牛	猪	羊	家禽
岗南—黄壁水库流域	TN	—	16.41	1.20	0.12	0.02
	TP		1.20	0.24	0.02	0.01
来源北京地区	TN	1.58	6.11	0.45	0.23	0.03
	TP	0.16	1.01	0.17	0.05	0.01
长江流域	TN	2.9~3.8	3.7~4.6			
	TP	1.9~2.3	2.2~2.7			
昆明云龙水库	TN	4.2	16.25	2.21	1.13	0.12
	TP	0.45	2.82	0.73	0.41	0.04

注：家禽为鸡、鸭的平均值。

2 结果与分析

2.1 水源区各乡镇非点源氮、磷负荷产生量分析

根据云龙水库自然和社会条件,应用适用于大区

域尺度非点源估算的输出系数模型方法,估算云龙水库径流区氮磷非点源污染产生量、入库量等。昆明市云龙水库非点源污染物总氮和总磷负荷产生量计算结果详见表 3—4。

表 3 2010 年昆明市云龙水库非点源污染物总氮负荷产生量

乡镇名	农业用地		畜禽粪便				农村生活区/(kg·a ⁻¹)	合计/(kg·a ⁻¹)	总氮负荷贡献率/%
	耕地/(kg·a ⁻¹)	林地/(kg·a ⁻¹)	牛/(kg·a ⁻¹)	猪/(kg·a ⁻¹)	羊/(kg·a ⁻¹)	家禽/(kg·a ⁻¹)			
撒营盘镇	89 472	54 007	32 711	9 945	13 975	56 103	188 681	444 893	21.39
云龙乡	39 791	60 873	39 260	31 957	11 773	5 793	61 979	251 426	12.09
马鹿塘乡	68 284	34 048	19 809	53 036	12 214	5 158	84 512	277 060	13.32
皎平渡镇	52 736	52 201	41 243	53 747	15 364	2 085	94 672	312 047	15.00
团街镇	69 111	34 569	47 531	49 115	4 810	5 616	88 141	298 894	14.37
茂山镇	52 476	4 212	3 185	11 854	4 099	7 811	88 141	171 778	8.26
插甸乡	51 053	4 175	83 249	66 945	13 924	6 717	97 642	323 705	15.56
合计	422 923	244 084	266 988	276 599	76 159	89 283	703 769	2 079 804	100
总氮负荷量贡献率/%	20.33	11.74	12.84	13.30	3.66	4.29	33.84	100	—

表 4 2010 年昆明市云龙水库非点源污染物总磷负荷产生量

乡镇名	农业用地		畜禽粪便				农村生活区/ ($\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$)	合计/ ($\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$)	总磷负荷 贡献率/%
	耕地/ ($\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$)	林地/ ($\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$)	牛/ ($\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$)	猪/ ($\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$)	羊/ ($\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$)	家禽/ ($\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$)			
撒营盘镇	6 291	2 315	5 677	3 285	4 982	18 701	44 026	85 276	18.77
云龙乡	2 798	2 609	6 813	10 556	4 197	11 587	14 462	53 021	11.67
马鹿塘乡	4 801	1 459	3 438	17 519	4 355	10 316	19 720	61 606	13.56
皎平渡镇	3 708	2 237	7 157	17 754	5 478	4 170	22 090	62 593	13.78
团街镇	4 859	1 482	8 249	16 224	1 715	11 231	20 566	64 326	14.16
茂山镇	3 690	181	553	3 916	1 461	15 623	20 566	45 989	10.12
插甸乡	3 590	179	14 447	22 113	4 964	13 435	22 783	81 511	17.94
合计/($\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$)	29 737	10 461	46 333	91 365	27 152	85 062	164 213	454 322	100
总磷负荷量贡献率/%	6.55	2.30	10.20	20.11	5.98	18.72	36.14	100	—

由表 3—4 可知,云龙水库径流区总氮和总磷的非点源负荷产生量分别为 2 079.8 和 454.32 t/a,且总氮负荷量是总磷负荷量的 4.6 倍。从空间分布上分析,撒营盘镇、马鹿塘乡、皎平渡镇、团街镇、插甸乡 5 个乡镇的非点源污染物总氮、总磷负荷量都较高。其中,撒营盘镇的最高,总氮、总磷年均负荷量达到了 444.89 和 85.28 t/a。因为这些乡镇的耕地面积、农村人口、禽畜数量较多,均是产业结构单一,经济以农业为主,第二、三产业发展相对滞后的乡镇。相比之下,云龙乡和茂山镇的农村人口和禽畜数量较少,因此非点源污染负荷产出总量较低。按其在水源区污染物总氮负荷产生总量贡献率排序为:撒营盘镇>插甸乡>皎平渡镇>团街乡>马鹿塘乡>云龙乡>茂山镇。各乡镇对于总磷负荷量的有所变动,其排列顺序为:撒营盘镇>插甸乡>团街乡>皎平渡镇>马鹿塘乡>云龙乡>茂山镇。综合分析可知,撒营盘镇的氮、磷污染产生量是水源库区非点源污染物总氮和总磷负荷量的主要影响因素。

2.2 不同污染源类型对总氮和总磷负荷产生量的贡献分析

由表 3 可以发现,农村生活污染源对非点源污染物总氮负荷量贡献率最高 33.84%。不同污染源类型产生的总氮负荷量以及对总氮负荷量的贡献率的大小顺序为:农村生活区>畜禽粪便(其中,猪>牛>羊>家禽)>耕地>林地。不同土地利用方式对流域非点源污染物总氮负荷产出量的影响,以农村生活区污染最大,畜禽养殖业和耕地的次之,林地的最小。表 4 的数据显示,污染源类型对总磷负荷贡献率的影响与对总氮污染负荷的影响规律基本相似,但畜禽粪便污染对总磷负荷的贡献明显大于农村生活区污染和耕地的贡献。不同污染源类型对总磷负荷贡献率的大小顺序为:畜禽粪便(其中,猪>家禽>牛>羊)>农村生活区>耕地>林地。这些表明,在各种土地

利用类型中,目前水源的畜禽养殖和农村居民生活用地对非点源污染物总氮和总磷的贡献最大,因此为减少环境污染,农村地区污水、生活垃圾及禽畜粪便的日常处理显得非常重要。除此之外,大量畜禽养殖是造成该区非点源污染物总氮和总磷负荷量较高的直接原因。但不同乡镇畜禽的年存栏量和年出栏数量是不固定的,而且数量变动随机性大。因此,由于畜禽养殖业的发展引起环境质量的不利影响需要引起足够的重视,并且对各乡镇畜禽种类、年存栏量、年出栏数量定时统计上报,为研究工作提供基础数据。

2.3 水源区入库氮磷污染负荷

入库污染物是影响水库水质的根本原因。根据《全国水环境容量核算指南》中提供的技术参数,结合云龙水库的实际情况,分别确定各污染源的入库系数:耕地和林地的氮磷流失根据相关文献分析可取入库系数为 0.1;而农村生活和畜禽粪便产生的污染负荷大部分通过河道汇集后进入水库,取这类污染源的氮、磷入库系数分别 0.1 和 0.05。从而计算得到云龙水库非点源总氮、总磷入库量见图 1—2。

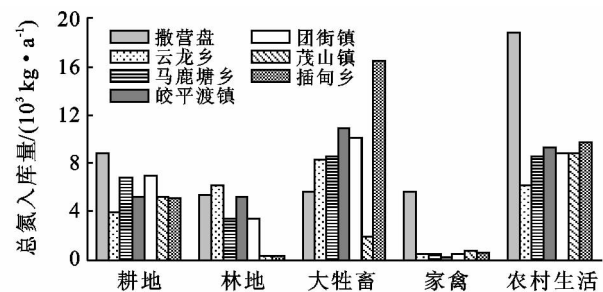


图 1 昆明市云龙水库入库总氮负荷

从图 1—2 可以看出,由不同污染源产生的总氮和总磷的入库负荷量分别为 207.98 和 24.73 t/a,总氮入库总量是总磷入库总量的 8.4 倍。入库的总氮负荷的主要污染来源是农村生活区污染和畜禽粪便

污染,其入库总氮负荷量分别为 70.38 和 70.90 t/a, 占总入库总氮负荷量的 33.84%~34.09%。水库周边村落是水库水环境的重要污染源之一,周边村落污水目前均未治理。村落污水非汛期常以氮磷污染物高浓度状态的聚集于村落洼地及沟渠之中,汛期暴雨将其一起携带入库,直接污染库区水体。

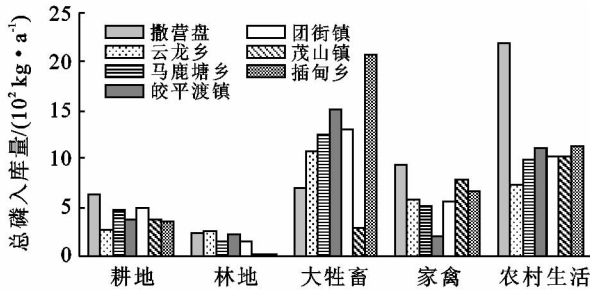


图 2 昆明市云龙水库入库总磷负荷

根据不同污染源入库的总氮负荷贡献率的顺序为:农村生活>畜禽粪便(其中大牲畜>家禽)>耕地>林地。从图 2 可看出,入库总磷负荷的主要污染源为畜禽粪便污染和农村生活污染,其入库总磷负荷为 12.50 和 8.21 t/a, 分别占总负荷的 50.54% 和 33.21%, 而林地产生的入库总磷负荷为 1.05 t/a, 占总入库量的百分比也最低,为 4.23%。根据不同污染源的入库总磷负荷贡献率的顺序为:畜禽粪便(其中,大牲畜>家禽)>农村生活>耕地>林地。

3 结论

(1) 云龙水库径流区氮磷负荷总的产生量分别为 2 079.8 和 454.32 t/a, 按其对水源区污染物负荷产生总量贡献率总氮排序为:撒营盘镇>插甸乡>皎平渡镇>团街乡>马鹿塘乡>云龙乡>茂山镇;总磷负荷贡献排列顺序为:撒营盘镇>插甸乡>团街乡>皎平渡镇>马鹿塘乡>云龙乡>茂山镇。

(2) 不同污染源类型产生的总氮负荷及对总氮负荷的贡献率大小顺序为:农村生活区>畜禽粪便(其中,猪>牛>羊>家禽)>耕地>林地。其中农村生活污染对非点源污染物总氮负荷贡献率最高 33.84%。林地贡献率最小为 11.74%。不同污染源类型对总磷负荷贡献率的大小顺序为:畜禽粪便(其中,猪>家禽>牛>羊)>农村生活区>耕地>林地。其中畜禽粪便污染对总磷负荷的贡献明显大于农村生活区和耕地的贡献。

(3) 水库径流区不同污染来源产生的总氮和总磷的入库负荷量分别为 207.98 和 24.73 t/a, 总氮入库总量是总磷入库总量的 8.4 倍。入库总氮负荷的

主要污染来源是农村生活区污染和畜禽粪便污染,其入库总氮负荷分别为 70.38 和 70.90 t/a, 占总入库总氮负荷的 33.84%~34.09%。入库总氮负荷贡献率的顺序为:农村生活>畜禽粪便(其中,大牲畜>家禽)>耕地>林地。按入库总磷负荷贡献率的大小顺序为:畜禽粪便(其中,猪>家禽>牛>羊)>农村生活区>耕地>林地。

[参 考 文 献]

- [1] 邱凉,罗小勇,程红光. 长江流域大尺度空间非点源污染负荷研究[J]. 人民长江, 2011, 42(18): 81.
- [2] 贺缠生,傅伯杰. 非点源污染的管理及控制[J]. 环境科学, 1998, 19(5): 15-18.
- [3] Kronvang B. Diffusenutrient losses in Denmark[J]. Water Sci. Technol., 1996, 133(1): 81-88.
- [4] Boersp C M. Nutriente missions from agriculture in the Nether lands; Causes and remedies[J]. Water Sci. Technol., 1996, 33(1): 183-191.
- [5] Clesceri N L, Curran S J, Sedlak R I. Nutrient loads in Wisconsin lakes(Part 1): Nitrogen and phosphorous export coefficients[J]. Water Resources Bulletin, 1986, 22(6): 983-989.
- [6] Dickerh D, Haith D A. Loading functions for predicting nutrient losses from complex watersheds[J]. Water Resources Bulletin, 1983, 19(6): 951-959.
- [7] Reckhow K H, Beaulac M N, Simpson J T. Modeling Phosphorus Loading and Lake Response Under Uncertainty: A Manual and Compilation of Export Coefficient [S]. U. S. EPA Report No. EPA-440/5-80-011, Washington D C: Office of Water Regulations, Criteria and Standards Division, U. S. Environmental Protection Agency, 1980.
- [8] Ierodiconou D, Laurenson L, Leblanc M, et al. The consequences of land use change on nutrient exports: A regional scale assessment in South-west Victoria, Australia[J]. J. Environ Manage., 2005, 74(4): 305-316.
- [9] 刘瑞民,杨志峰,丁晓雯,等. 土地利用/覆盖变化对长江上游非点源污染影响研究[J]. 环境科学, 2006, 27(12): 2407-2414.
- [10] 龙天渝,梁常德,李继承,等. 基于 SLURP 模型和输出系数法的三峡库区非点源氮磷负荷预测[J]. 环境科学学报, 2008, 28(3): 574-581.
- [11] 刘亚琼,杨玉林,李法虎. 基于输出系数模型的北京地区农业面源污染负荷估算[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 7-12.
- [12] 耿润哲,王晓燕,吴在兴,等. 北运河下游不同土地利用非点源污染负荷估算[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(7): 1412-1420.

(下转第 284 页)

- [6] 王晓燕,陈洪松,王克林,等.不同利用方式下红壤坡地土壤水分时空动态变化规律研究[J].水土保持学报,2006,20(2):110-113.
- [7] 李禄军,蒋志荣,车克钧,等.绿洲—荒漠交错带不同沙丘土壤水分时空动态变化规律[J].水土保持学报,2007,21(1):123-127.
- [8] 杨晓东,吕光辉,张雪梅,等.艾比湖湿地自然保护区 8 个乔灌木种空间分布格局分析[J].植物资源与环境学报,2010,19(4):37-42.
- [9] 杨晓东,傅德平,袁月,等.新疆艾比湖湿地自然保护区主要植物的种间关系[J].干旱区研究,2010,27(2):249-256.
- [10] 何静,高翔,吕光辉,等.艾比湖自然保护区植物群落的数量分类及土壤环境解释[J].新疆农业科学,2010,47(5):1030-1035.
- [11] 刘晓星,吕光辉,杨晓东,等.艾比湖流域 5 种土壤类型的酶活性和理化性质[J].干旱区研究,2012,29(4):579-585.
- [12] 金海龙,白祥,满中龙,等.新疆艾比湖湿地自然保护区土壤空间异质性研究[J].干旱区资源与环境,2010,24(2):150-157.
- [13] 王合玲,张辉国,秦璐,等.新疆艾比湖流域土壤有机质的空间分布特征及其影响因素[J].生态学报,2012,32(16):4969-4980.
- [14] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,1999.
- [15] 宋新山,何岩,汪永辉.水土化学场理论在松嫩平原盐渍土研究中的应用[J].地理科学,2003,23(1):72-76.
- [16] 王政权.地统计学及其在生态学中的应用[M].北京:科学出版社,1999:162-192.
- [17] Nielsen D R, Bouma J. Soil Spatial Variability[M]. Wageningen: PUDOC, 1985: 2-30.
- [18] 郭旭东,傅伯杰,陈利顶,等.河北省遵化平原土壤养分的时空变异特征:变异函数与 Kriging 插值分析[J].地理学报,2000,55(5):555-566.
- [19] 李芸君,吕光辉,贡璐,等.艾比湖湿地自然保护区克隆植物群落空间格局及其对水盐胁迫的响应[J].干旱区研究,2013,3(1):122-128.
- [20] 宋同清,彭晚霞,曾馥平,等.木论喀斯特峰丛洼地森林群落空间格局及环境解释[J].植物生态学报,2010,34(3):298-308.
- [21] Weiner J, Wright D B, Castro S. Symmetry of below-ground competition between *Kochia scoparia* individuals[J]. Oikos, 1997,79(1):85-91.

(上接第 278 页)

- [13] Johnes P J, Heathwaite A L. Modeling the impact of land use change on water quality in agricultural catchments[J]. Hydrological Processes, 1997, 11(3):269-286.
- [14] 庄永涛.渭河临潼断面以上流域非点源总氮负荷研究[D].陕西 西安:西安理工大学,2002.
- [15] 薛利红,杨林章.面源污染物输出系数模型的研究进展[J].生态学杂志,2009,28(4):755-761.
- [16] 梁常德,龙天渝,李继承,等.三峡库区非点源氮磷负荷研究[J].长江流域资源与环境,2001,16(1):26-30.
- [17] 段亮,段增强,夏四清.太湖旱地非点源污染定量研究[J].水土保持通报,2006,26(6):40-43.
- [18] 李根,毛峰.我国水土流失型非点源污染负荷及其经济损失评估[J].中国水土保持,2008(2):9-11.
- [19] Beaulac M N, Reckhow K H. An examination of land use nutrient export relationships[J]. Water Resources Bulletin, 1982,18(6):1013-1024.
- [20] Frink C R. Estimating nutrient exports to estuaries [J]. Journal of Environmental Quality, 1991, 20(4): 717-724.
- [21] 陆建忠,陈晓玲,肖靖靖,等.改进的输出系数法在农业污染源估算中的应用[J].华中师范大学学报,2012,46(3):374.
- [22] 焦艳平,马香玲,艾万祥,等.岗南、黄壁庄水库上游流域非点源污染负荷估算[J].南水北调与水利科技,2010,8(2):96.
- [23] 曹彦龙,李崇明,郭劲松,等.重庆三峡库区非点源污染来源分析及负荷计算[J].重庆建筑大学,2007,29(4):2.
- [24] 沈珍瑶,刘瑞民,叶闽,等.长江上游非点源污染特征及其变化规律[M].北京:科学出版社,2008:348-358.
- [25] 韩明明.云南省昆明禄劝彝族苗族自治县[OL].(2011-01-25)[2013-05-26].云南:www.ynszxc.gov.cn, 2009.