

RIP_ N 模型对官厅水库库滨带去氮效应的流域尺度模拟分析

王雪蕾¹, 刘昌明^{2,3}, 杨胜天^{1*}, Mannaerts C M⁴, 高云飞¹, 李茜⁵

(1. 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 遥感科学国家重点实验室, 遥感与地理信息系统研究中心, 环境遥感与数字城市北京市重点实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 4. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, Enschede 7500 AA, Netherlands; 5. 中国环境监测总站, 北京 100012)

摘要: 以官厅水库库滨带为研究对象, 构建适用于流域尺度岸边带去氮负荷估算的生态水文模型——RIP_ N (Riparian-Nitrogen) 模型, 对官厅水库库滨带 2007 年 3~9 月间岸边带去氮效应进行分析。同时, 在延庆水保站开展田间尺度的野外模拟实验, 结合室内外试验分析和以往研究成果, 对模型模拟结果进行验证。RIP_ N 模型包括土壤化学过程模拟和植物生长过程模拟。前者包括土壤反硝化模拟、硝化模拟和氨挥发模拟; 后者包括植物净第一性生产力(net primary productivity, NPP) 模拟、植物生产力分配模拟和植物营养元素吸收模拟。结果表明: ①RIP_ N 模型模拟值与实验值的决定系数大于 0.5, 证明该模型在空间尺度模拟上的有效性及模拟结果的可靠性; ②模型模拟结果表明官厅水库库滨带流域 3~9 月对 N 的总去除量为 5.91×10^3 t; ③RIP_ N 模型对官厅水库库滨带去氮环境效益分析表明, 当前库滨带土地利用格局中, 滩地、林地和草地是去污效果较好的土地利用类型, 3~9 月对流域的去 N 量占流域总去 N 量的 76.5%, 在非点源污染防治中起到“汇”的作用; 但是研究区中专属湿地的“汇”作用表现不明显, 3~9 月去 N 量仅占流域总去 N 量的 5.9%。

关键词: RIP_ N 模型; 库滨带; 氮; 土壤反硝化; 植物生长; 官厅水库

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)09-2502-10

Effect of Nitrogen Removal Simulated by RIP_ N Model to a Riparian Zone in Guangting Reservoir Catchment

WANG Xue-lei¹, LIU Chang-ming^{2,3}, YANG Sheng-tian¹, Mannaerts C M⁴, GAO Yun-fei¹, LI Qian⁵

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by Beijing Normal University and Institute of Remote Sensing Applications; Research Center for Remote Sensing and GIS, Beijing Key Laboratory for Remote Sensing of Environment and Digital Cities, School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. College of Water Resource, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Key Laboratory of Water Cycle & Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 4. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, Enschede 7500 AA, Netherlands; 5. China National Environmental Monitoring Center, Beijing 100012, China)

Abstract: An eco-hydrological model system (RIP_ N) was constructed to simulate the nitrogen (N) removal by riparian zone in reservoir catchment scale. As a case study, the N removal in Guangting Reservoir riparian zone from March to September in 2007 was estimated. At same time, the field simulated experiment was carried out in Yanqing experimental station, which lies in the northeast part of the catchment. With the experimental data and previous studies, the RIP_ N model was calibrated. RIP_ N model was consisted with two parts, which were soil chemical process modeling and plant growth modeling. Soil chemical processes considered the soil denitrification, nitrification and ammonium volatilization. Plant growth included net primary productivity (NPP) module, plant production allocation module and nutrition uptake module. The research indicated that the correlation coefficient between simulated value and monitored value was larger than 0.5, which proved the effectiveness and reliability of RIP_ N model in catchment scale simulating. The simulated results showed that the N removal loss by riparian zone in Guangting Reservoir catchment from March to September was 5.91×10^3 t. The model also identified the N removal functions of different land use. At present land use condition, the bottomland, forest land and grassland contributed positively environmental benefits and removed most of N. In the temporal scale, the N removal from March to September consisted 76.5% of annual removal load. On the contrary, the wetlands just removed 5.9% of N of whole watershed. By comparison, the riparian zone was recognized as critical location for non point source pollution prevention.

Key words: RIP_ N Model; riparian zone; nitrogen; soil denitrification; plant growth; Guangting Reservoir

收稿日期: 2008-10-22; 修订日期: 2009-01-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(40671123); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA12Z145); 国家科技支撑计划项目(2006BA B06B07); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2005CB42207)

作者简介: 王雪蕾(1978~), 女, 博士后, 主要研究方向为岸边带生态系统流域尺度模拟, E-mail: wxuelei@bnu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: yangshengtian@bnu.edu.cn

当前, 岸边缓冲带建设是非点源污染控制中采用的一种重要的生态工程方式. 岸边缓冲带是指利用永久性植被拦截污染物或有害物质的条带状、受保护的带^[1], 其实质是在污染源和水体之间、具有缓冲污染物功能的水陆交错生态系统. 发达国家十分重视岸边缓冲带的建设, 如美国由自然资源保护局领导, 联合农业研究局(ARS)、农场服务局(FSA)、森林局(FS)等, 通过保护保持项目(CRP)、环境质量鼓励计划(EQIP)、野生动物栖息地鼓励计划(WHIP)、湿地保留计划(WICP)及危机湿地保护计划(EWP)等, 开展岸边缓冲带建设, 到目前为止, 已建成约 24 万 km² 的缓冲带^[2]. 近年来, 我国也开始重视岸边缓冲带在生态环境建设中的重要作用, 现已在滇池^[3]、太湖和白洋淀等流域开展了岸边带生态示范工程建设^[4], 以遏制面源污染的进一步恶化. 关于当前岸边带的研究进展参见文献[5].

然而, 岸边缓冲带工程措施难以在更大的空间尺度上实现岸边带生态系统的可持续综合管理, 因此, 对流域尺度岸边带生态水文过程的模拟成为实现岸边带可持续综合管理的重要工具之一. 生态水文模型是将水文和生态相互作用过程用数学模型的方式进行描述. 纵观当前的生态水文模型, 包括应用广泛的 SWAT 模型^[6]、建立在 SWAT 模型基础上的

SWIM 模型^[7]和岸边带田间尺度综合管理 REMM 模型^[8]等. 这些模型能够从机制过程角度对岸边带生态水文过程进行描述, 并对其生态功能进行评估, 但是在空间尺度和应用范围方面存在一定缺陷. 例如基于水文过程的 SWAT 模型, 重点放在流域的产汇流方面, 并没有将岸边带作为一个独立的纳污系统进行深刻描述; SWIM 模型明确了岸边带生态系统的重要功能, 但是这部分模块仍在开发中, 未见其在流域尺度中的应用成果; REMM 模型是相对比较完善的用于岸边带生态系统模拟的模型, 但是它的应用尺度较小, 不适用于大尺度的模拟.

基于上述分析, 本研究从岸边带去氮机制出发, 集成已有生态水文模型的研究成果, 结合遥感技术, 构建适用于流域尺度的岸边带去氮 RIP_N 模型 (Riparian Nitrogen Model), 并应用该模型对北京市官厅水库库滨带的去氮效应进行流域尺度评估. RIP_N 模型的开发和应用, 为实现水库岸边带生态系统的可持续综合管理提供了科学依据.

1 研究区概况

官厅水库建于 1954 年, 1989 年扩建后总库容为 $41.6 \times 10^8 \text{ m}^3$, 是多年调节大型水库(图 1). 官厅水库地处北京西北 100 km 处, 河北省怀来县南部和北

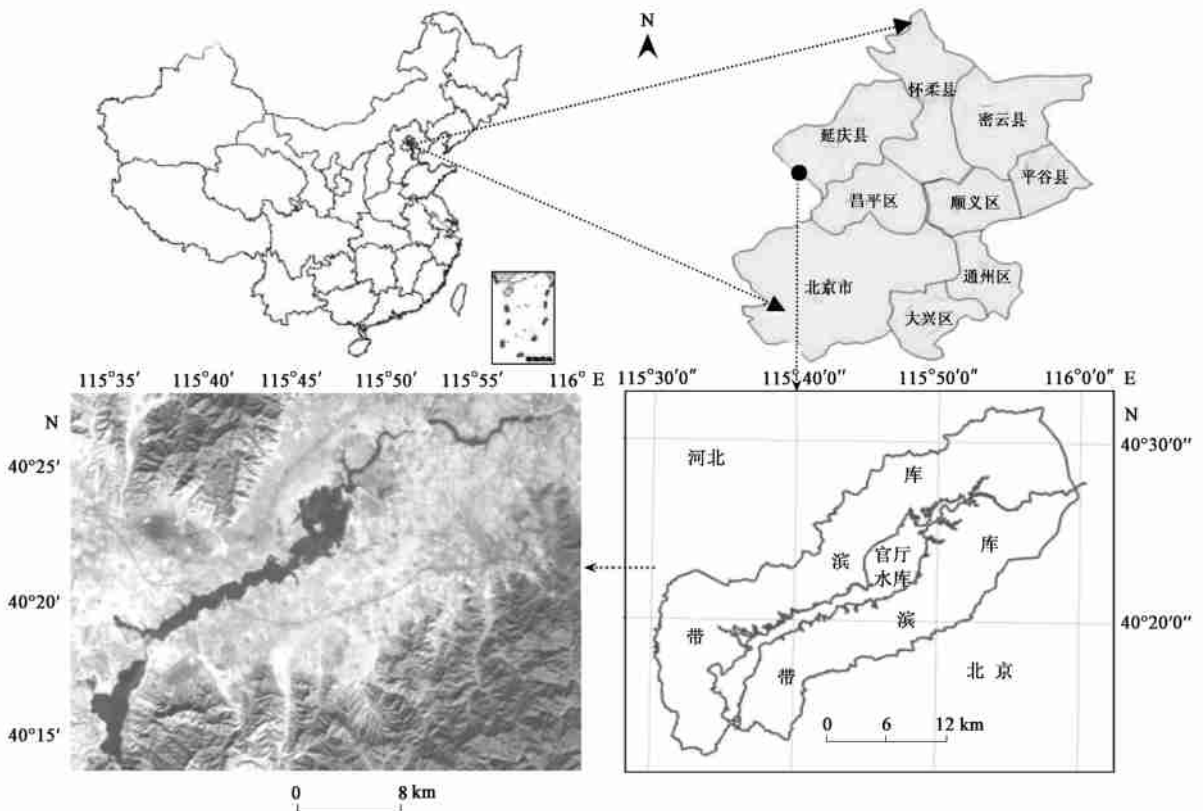


图 1 官厅水库位置及库滨带范围示意

Fig. 1. Location and scope of research field.

京市延庆县西部,位置在北纬 $31^{\circ} \sim 41^{\circ}$,东经 $112^{\circ} \sim 117^{\circ}$,水库流域面积 $4.6 \times 10^4 \text{ km}^2$.官厅水库流域属于半干旱大陆季风型气候区,多年平均气温约为 $2 \sim 8^{\circ}\text{C}$,最低气温 -26°C ,最高气温 42.2°C ,最大风速 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,流域多年平均降雨量为 406 mm ,年内降水量主要集中在7、8月份,多年平均径流量为 $14.63 \times 10^8 \text{ m}^3$.据怀来、延庆两县气象观测资料统计,官厅水库库滨带年内气温变化明显,一般6~8月气温较高,11~2月份气温较低,月平均气温在 $21.6 \sim 27.2^{\circ}\text{C}$,无霜期为 $149 \sim 165 \text{ d}$;库滨带内主导风向为北风和西北风,6~8月份为东北风和东风,月平均风速为 $3.1 \sim 4.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,大风日数为 $39 \sim 60 \text{ d}$.

依据北京市、河北省和山西省人民政府1984年颁布的《官厅水系水源保护管理办法》的规定,将水库二级保护区(官厅水库一级保护区范围为官厅水库最高水位线 479 m 高程以内范围)定为库滨带的区域范围,即官厅水库最高水位 479 m 线以外 5 km

范围.研究区位置见图1.

2 材料与方法

2.1 模型构建

RIP-N模型(Riparian Nitrogen)主要是从岸带去氮机制出发,耦合定量遥感反演模型,以ENVI/IDL(Interactive Data Language)为软件平台,自主开发的具有流域尺度去氮效用模拟功能的过程机制模型.RIP-N模型包括两大部分,分别为土壤化学过程模拟和植物生长过程模拟.前者包括土壤反硝化模拟、硝化模拟和氨挥发模拟,后者包括植物净第一性初级生产力(net primary productivity, NPP)模拟、植物生产力分配和植物营养元素吸收模拟.RIP-N模型的基础数据包括遥感数据、气象数据和土壤数据.RIP-N模型的具体算法流程见图2.RIP-N模型的主模型构架和基本原理见表1.模型中的参变量见表2.

表1 RIP-N模型模块组成和构建原理
Table 1 Construction and the theories of RIP-N model

子模型	模型描述	主方程	文献
土壤水分	依据水平平衡原理,模拟不同深度土层土壤湿度的日变化	降水条件(有棵间蒸发): $SW^{j+1} = SW^j + \Delta D^j - E_{\text{tr}}^j - S_{\text{root}}^j$ 非降水条件: $SW^{j+1} = SW^j - E_{\text{tr}}^j - S_{\text{root}}^j$ 改进了根系吸水模型: $S_{\text{root},z} = K_s \cdot T_p \cdot [1 - \exp(-\beta_r \cdot z/z_{\text{root}})]$	[9~12]
土壤温度	模拟不同深度土层土壤温度的日变	$T_s(z, dn) = \zeta \cdot T_s(z, dn-1) + (1.0 - \zeta) [df \cdot (T_{\text{AAir}} - T_{\text{surf}}) + T_{\text{soil}}]$ 校正参数方程 $df: df = \frac{zd}{zd + \exp(-0.867 - 2.078 \cdot zd)}$ $zd = 0.5 \cdot Z_{\text{mid}} / D_{\text{dd}}$	[12]
土壤反硝化(SDR)	模拟土壤硝态氮转化成氮气的速率	$D_a = D_{\text{f}} \cdot f_{\text{f}} \cdot f_{\text{f}} \cdot f_{\text{f}} \cdot \mu$ $D_p = \frac{4}{5} \frac{\alpha_{\text{em}}}{365} C \frac{14}{12} 10^6$ $f_N = \min \left[1, \frac{N}{N_{\text{crit}}} \right]$ $f_s = \begin{cases} 0 & S < S_{\text{FC}} \\ \left(\frac{S - S_{\text{FC}}}{S_m - S_{\text{FC}}} \right)^w & S_{\text{FC}} \leq S \leq S_m \\ 1 & S_m < S \end{cases}$ $f_T = \begin{cases} 0 & T_s \leq 0 \\ Q_{10}^{0.1} T_s^{-2.5} & 0 < T_s < 25 \\ 1 & 25 \leq T_s \end{cases}$ $f_{\text{pH}} = \begin{cases} 0 & \text{pH} \leq 3.5 \\ (\text{pH} - 3.5)/3 & 3.5 < \text{pH} < 6.5 \\ 1 & \text{pH} \geq 6.5 \end{cases}$	[13~17]
土壤硝化和氨挥发(SNR & SAV)	模拟土壤硝化速率和铵根离子转化成氮气的速率	$N_{\text{nit}/\text{vol},t} = \text{NH}_4^+ [1 - \exp(-\eta_{\text{nit},t} - \eta_{\text{vol},t})]$	[12, 18]
植被净第一性生产力(NPP)	模拟用于植物生长和生殖的有机碳的月变化量	$\text{NPP} = \text{GPP} - R_a$ $\text{GPP} = \epsilon \times \text{APRA} \times f_1(T) \times f_2(\beta)$ $R_a = (7.825 + 1.145T_a) \times \text{GPP} / 100$	[19~23]
植被生产力分配	模拟NPP在植物体根茎叶各器官的分配量	$\frac{d\text{NPP}_{\text{Leaf}}}{dt} = R_{\text{leaf}} \cdot \frac{\epsilon_{\text{LA}}}{dt}$ $\frac{d\text{NPP}_{\text{Root}}}{dt} = K_r \left(\frac{d\text{NPP}}{dt} - \frac{d\text{NPP}_{\text{Leaf}}}{dt} \right)$ $\frac{d\text{NPP}_{\text{Wale}}}{dt} = \frac{d\text{NPP}}{dt} - \frac{d\text{NPP}_{\text{Leaf}}}{dt} - \frac{d\text{NPP}_{\text{Root}}}{dt}$	[24, 25]
植物营养元素吸收	模拟植物体在生长过程中对N营养元素的吸收量变化	$N_{\text{uptake}} = \min(N_{\text{avail}}, N_{\text{dem}})$ $N_{\text{dem}} = \text{NPP} \times N_{\text{c,org}}$ $N_{\text{avail}} = \text{NH}_4^+_{\text{Exch}} + \text{NO}_3^-_{\text{Soil}}$	[20, 21, 24, 25]

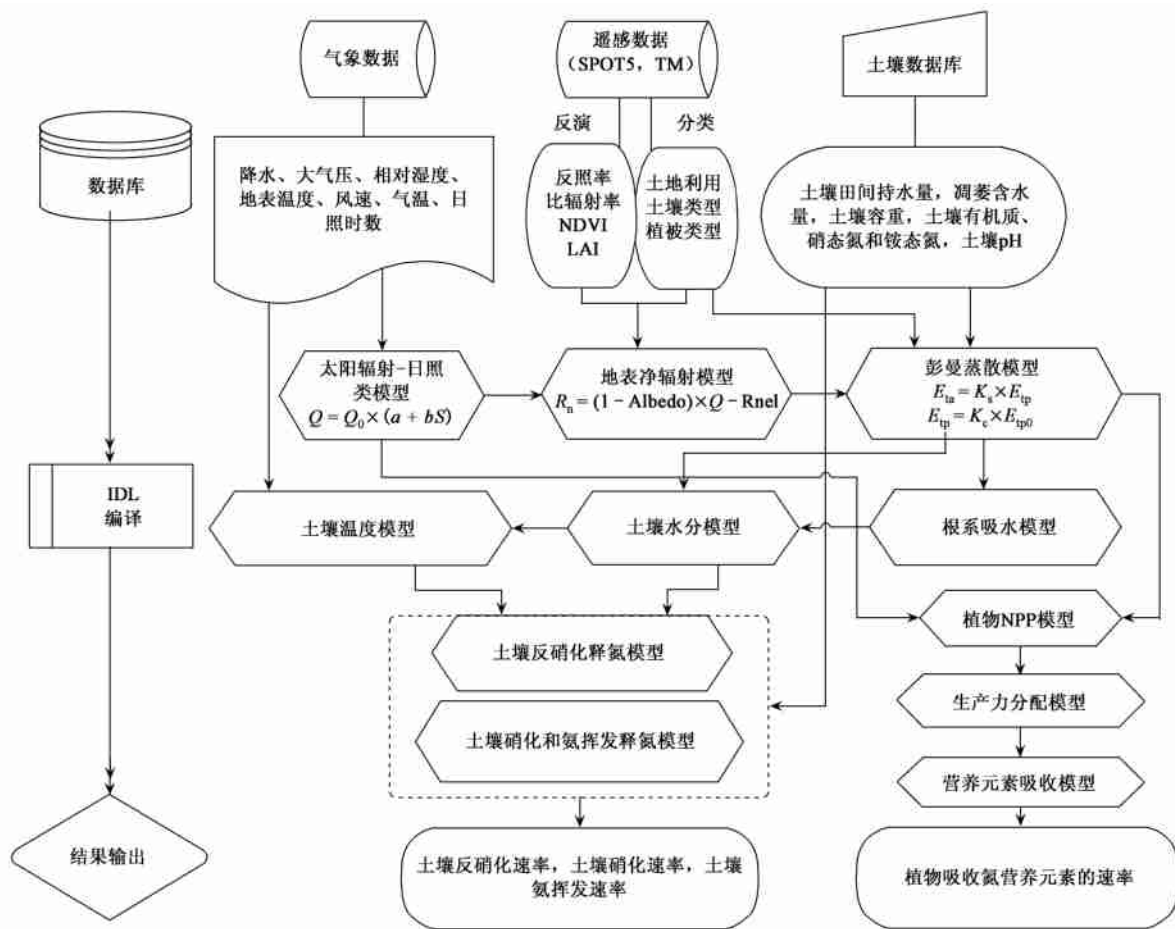


图 2 RIP_N 模型计算流程

Fig. 2 Flow chart of RIP_N modeling

2.2 数据库

2.2.1 气象数据

采用国家基础气象数据库延庆站和怀来站的常规气象数据, 数据时间为 2007-03-01~2007-09-30, 数据指标为日均大气温度、降水、相对湿度、大气压、日照时数、2m 风速、0 地表温度、日最高气温和日最低气温。

2.2.2 土壤数据

土壤数据主要参考国家第二次土壤普查的结果和研究区相应土壤调查报告。土壤数据包括土壤容重、土壤有机质含量、土壤硝态氮含量、土壤铵态氮含量、土壤田间持水量、土壤凋萎含水量和土壤 pH 值等。

2.2.3 遥感数据

选择 SPOT5 遥感影像结合 Landsat-5 TM 遥感影像数据对官厅水库库滨带的空间结构信息进行提取。其中, 主要应用 SPOT5 遥感数据对库滨带的土地覆盖/利用和土壤类型空间信息进行提取, 应用 3

~ 9 月的 Landsat-5 TM 遥感数据实现岸边带陆表信息的反演。遥感数据信息列表见表 3~ 表 5。

2.3 遥感信息提取

2.3.1 土地利用和土壤类型空间信息提取

应用非监督分类与目视解译结合的解译方法, 得到研究区土地利用空间分布, 如图 3 所示, 具体研究方法参见文献[26]。应用杨胜天等^[27]提出的 RS 和 GIS 相结合的研究方法对研究区进行土壤类型的空间信息提取, 结果见图 4。

2.3.2 遥感影像数据预处理

遥感数据预处理主要包括遥感数据的几何纠正、辐射定标和大气纠正。图像的几何纠正是对图像进行配准和重采样; 辐射定标目的是把图像上的 DN 值转为辐亮度或反射率; 大气纠正是指为消除在传感器获取地表信息过程中, 大气分子、气溶胶等大气成分吸收和散射的影响而进行的辐射校正; 研究中遥感数据的处理平台为 ENVI 软件, 编程语言为 IDL。Landsat-5 TM 数据辐射定标公式^[28]如下:

表 2 模型中的重要参变量列表

Table 2 Main parameters list

参数/单位	含义	参数/单位	含义
SW/mm	为土壤含水量	$S_{root,z}/mm$	Z 土层深度的根系吸水量
E_d/mm	土表实际棵间蒸发量	T_p/mm	植物的潜在蒸腾量
K_s	土壤水分胁迫系数	Z/mm	植被根系深度
β_r	有效水分分配系数	$T_d/^\circ C$	土壤温度
Z_{root}/mm	根在土层中的深度	df	土壤深度影响因子
ζ	温度传播的延迟因子	$T_{surf}/^\circ C$	土壤地表温度
$T_{AA_{air}}/^\circ C$	年均大气温度	Zd	土壤深度与阻尼深度的比例系数
dn	积日	Z_{mid}/mm	土层半深距离
D_{dl}/mm	阻尼深度	$D_p/kg\cdot(m^2\cdot d)^{-1}$	潜在反硝化速率
$D_a/kg\cdot(m^2\cdot d)^{-1}$	实际反硝化速率	f_s	无维土壤水分衰减函数
f_N	无维土壤硝酸盐衰减函数	f_T	无维土壤温度衰减函数
f_{pH}	无维土壤酸碱性衰减函数	α_{om}	土壤有机质衰减率
$C/g\cdot g^{-1}$	土壤中碳的含量	$N_{crit}/mg\cdot kg^{-1}$	反硝化反应发生的 N 元素临界值
$N/mg\cdot kg^{-1}$	土壤中硝酸盐含量	S	土壤饱水率
S_{FC}	土壤田间持水量时的土壤饱水率	$T/^\circ C$	参考温度
Q_{10}	温度增长 10℃ 时反硝化速率的增长因子	$NH_4^+/kg\cdot m^{-2}$	l 土层中 NH_4^+ 的含量
$N_{ni/vol,l}/kg\cdot m^{-2}$	l 土层中硝化和氨气挥发释放的 N 量	$\eta_{vol,l}$	l 土层中氨气蒸发的影响因子
$\eta_{nit,l}$	l 土层中硝酸盐影响因子	$GPP/g\cdot m^{-2}$	总第一性生产力
$NPP/g\cdot m^{-2}$	植物净第一性生产力	$\epsilon/g\cdot MJ^{-1}$	光能转化率
$R_d/g\cdot m^{-2}$	呼吸消耗量	$APAR/MJ\cdot m^{-2}$	考虑植物吸收的光有效辐射量
$f_1(T)$	温度对光合作用的影响函数	$f_2(\beta)$	水分对光合作用的影响函数
β	蒸发比	$NPP_{Leaf}/g\cdot m^{-2}$	叶片的 NPP
$T_d/^\circ C$	大气温度	ϵ_{LA}/m^2	面积月增加量
$R_{Leaf}/g\cdot m^{-4}$	单位面积叶片的生物量	K_r	分配系数
$NPP_{soil}/g\cdot m^{-2}$	分配到根系的 NPP	$N_{avail}/g\cdot m^{-2}$	土壤中供植被吸收的氮元素含量
$NPP_{woil}/g\cdot m^{-2}$	分配到枝干的 NPP	$N_{cor}/g\cdot g^{-1}$	植被中氮元素含量
$N_{uptak}/g\cdot m^{-2}$	植被对氮元素的吸收量	$NO_3^-/g\cdot m^{-2}$	土壤中可吸收的硝酸根量
$N_{dem}/g\cdot m^{-2}$	植被生长对氮元素的需求量	w	线性参数
$NH_4^+_{Exch}/g\cdot m^{-2}$	土壤中可交换的铵根离子量	S_m	f_s 等于 1 时的土壤饱水率
$\Delta D/mm$	降水或灌溉导致的土壤水分增量		

表 3 卫星遥感数据信息

Table 3 RS data information of SPOT5 and Landsat-5 TM

卫星数据	项目	接收日期	波段	影像大小/m	数据来源	轨道号	数据格式
SPOT5	多光谱影像(XS)	2005-09-01	1234	6000×6000	中国遥感卫星地面站	279-269	GEOTIFF
	全色影像(P)		1	24000×24000			
Landsat-5 TM	多光谱影像(XS)	2007-09-24	1234567	185000×185000	中国遥感卫星地面站	124-32	FAST

表 4 Landsat-5 TM 的波谱特征

Table 4 Spectral characteristic of Landsat-5 TM data

波段号	波段	光谱范围/ μm	中心波长/ μm	空间分辨率/m
band1	Blue-Green	0.45~0.52	0.458 0	30
band2	Green	0.52~0.60	0.560 0	30
band3	Red	0.63~0.69	0.660 0	30
band4	Near IR	0.76~0.90	0.830 0	30
band5	SWIR	1.55~1.75	1.650 0	30
band6	LWIR	10.4~12.5	11.400 0	120
band7	SWIR	2.08~2.35	2.220 0	30

表 5 SPOT5 波段信息

Table 5 Spectral characteristic of SPOT5 data

波段号	波段	光谱范围/ μm	空间分辨率/m
band1	Green	0.50~0.59	10
band2	Red	0.61~0.68	10
band3	Near IR	0.78~0.89	10
band4	SWIR	1.58~1.75	10
P	/	0.48~0.71	2.5

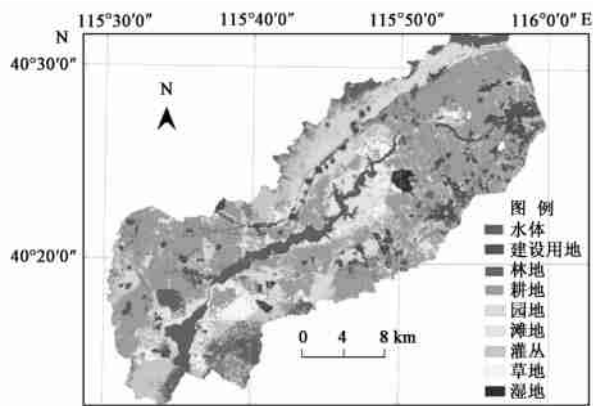


图 3 官厅水库库滨带土地利用类型分类

Fig.3 Map of land use/land change in riparian catchment of Guanting Reservoir

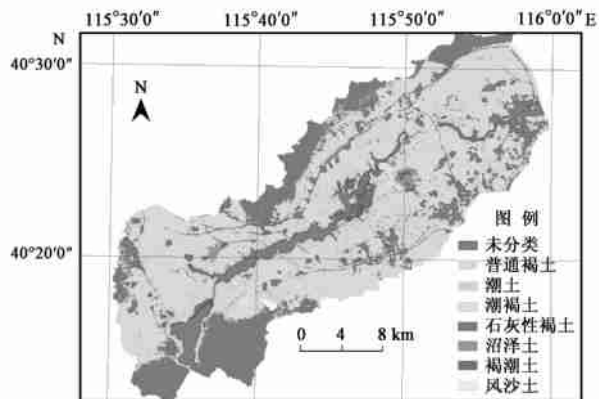


图 4 研究区土壤类型分类

Fig.4 Classification map of soil type in research areas

$$L_{rad} = \frac{L_{max-rad} - L_{min-rad}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} (Q_{cal} - Q_{calmin}) + L_{min-rad} \quad (1)$$

$$\rho_{\lambda} = \pi d^2 L_{rad} / [ESUN_{\lambda} \cos(\theta_z)] \quad (2)$$

式中, L_{rad} 表示对应于像元的光谱表观辐射亮度 [$W \cdot (m^2 \cdot sr \cdot \mu m)^{-1}$], $L_{min-rad}$ 表示传感器测量的最小表观辐射亮度 [$W \cdot (m^2 \cdot sr \cdot \mu m)^{-1}$], $L_{max-rad}$ 表示传感器测量的最大表观辐射亮度 [$W \cdot (m^2 \cdot sr \cdot \mu m)^{-1}$]; Q_{cal} 为校正量子化 DN 值, 且 $Q_{cal} = DN$; Q_{calmax} 为最大的校正量子化 DN 值, 且 $Q_{calmax} = 255$; Q_{calmin} 为最小的校正量子化 DN 值, 通常取值为 $Q_{calmin} = 0$; ρ_{λ} 为光谱反射率; $ESUN_{\lambda}$ 为第 λ 波段的太阳平均辐射强度 [$W \cdot (m^2 \cdot \mu m)^{-1}$]; θ_z 为太阳天顶角($^{\circ}$); d 为日地距离(天文单位)。

2.3.3 陆表参数遥感反演模型

采用 Liang^[29] 提出的针对 Landsat 5 TM 遥感数

据的多波段拟合方程对研究区进行陆表反照率参数反演(α_{short}), 具体表达式如下:

$$\alpha_{short} = 0.356\alpha_1 + 0.13\alpha_3 + 0.373\alpha_4 + 0.085\alpha_5 + 0.072\alpha_7 - 0.0018 \quad (3)$$

式中, α_i 为遥感数据第 i 波段的反射率。

采用 Tang 等^[30] 提出三波段梯度差植被指数法反演叶面积指数(leaf area index, LAI) 参数, 具体方程如下:

$$LAI = \begin{cases} \ln(1 - TGDVI/TGDVI_{max})/(-k) & A < 1 \\ LAI_{max} & A = 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中, A 为植被覆盖度; LAI_{max} 为该植被类型的最大 LAI 值; TGDVI 为三波段梯度差植被指数; k 为与几何结构有关的系数, 可以通过模拟、试验等方法获得。TGDVI 表达式如下:

$$TGDVI = \begin{cases} \frac{R_{ir} - R_r}{\lambda_r - \lambda_i} - \frac{R_r - R_g}{\lambda_r - \lambda_g} & TGDVI > 0 \\ 0 & TGDVI < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, R_{ir} 、 R_r 和 R_g 分别为近红外、红、绿波段的反射率; λ_r 、 λ_i 和 λ_g 为相应波段的中心波长。

采用 SEBAL 模型^[31] 中的地表辐射平衡方程计算地表净辐射量, 方程表达式如下:

$$R_n = (1 - \alpha_{short}) R_{swd\downarrow} + R_{lwd\downarrow} - R_{lwd\uparrow} - (1 - \epsilon_0) R_{lwd\downarrow} = (1 - \alpha_{short}) Q_0 + \epsilon_0 R_{lwd\downarrow} - \epsilon_0 \sigma T_s^4 \quad (6)$$

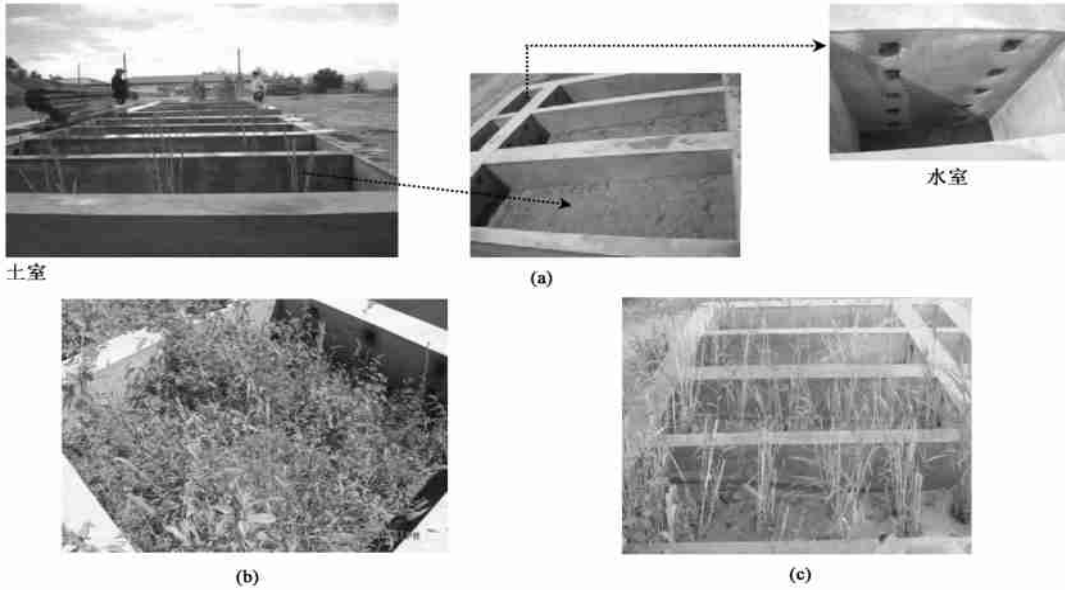
式中, α_{short} 为短波反照率(albedo); $R_{swd\downarrow}$ 为大气下行短波辐射($MJ \cdot m^{-2}$); Q_0 为太阳总辐射($MJ \cdot m^{-2}$); $R_{lwd\downarrow}$ 和 $R_{lwd\uparrow}$ 分别是大气向下和向上的长波辐射($MJ \cdot m^{-2}$); T_s 为地表温度($^{\circ}C$); ϵ_0 为地表宽波段比辐射率; 是 Stefan Boltzmann 常数, 值为 $4.903 \times 10^{-9} MJ \cdot (m \cdot K^2)^{-2}$ 。

2.4 野外试验研究

选择野外模拟试验方式实现从机制角度对模型进行验证。野外实验区选择在延庆水保站, 位于官厅水库库滨带流域的东北部, 延庆县大榆树镇上辛庄。试验区地理经纬度为 $115^{\circ}44' \sim 116^{\circ}34' E$ 和 $40^{\circ}16' \sim 40^{\circ}47' N$, 属于温带季风气候, 历年年平均气温为 $8.5^{\circ}C$, 降雨量为 $534.2 mm$ 。模拟实验区为人工修建的半封闭岸边带环境系统(图 5), 实验面积为 $36 m^2$, 主要实验仪器为 HOBO 小型气象站, 可以实现气温、太阳辐射、气压、风速等常规气象参数的高频自动连续观测, 同时在试验区埋设土壤温度和土壤湿度传感器, 实现土壤温湿度与气象参数的同步自动连续观测, 采样频度为 $30 min$ 。实验区以草本植物

群落为主, 主要物种为芦苇和紫花苜蓿; 实验内容为监测模拟岸边带环境下, 土壤中氮元素循环过程和植物对氮元素的吸收过程. 检测的化学指标包括土壤样品 TN、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 和有机碳的测定, 植物样品 TN 测定. 土壤和植物样品以月采样频率进行同

步采样. 对于植物样品, 每次采样后按照物种进行测试分析, 同时记录样品的鲜重和干重. 试验周期结束后, 采用收割法^[32]对单元小区进行的生物量的计算, 样方大小为 1 m × 1 m. 实验区土壤背景理化信息见表 6.



(a) 构建的实验小区全景; “水室”和“土室”的双室岸边带结构, 小区底部与地下水隔断, 是半封闭系统; (b) 实验过程中长出的草本群落; (c) 移栽后的芦苇群落

图 5 人工修建的半封闭岸边带实验小区

Fig.5 Constructed semi-enclosed experiment plot

表 6 岸边带小区土壤基本理化性质

Table 6 Characteristics of the soil in field experiments

土壤类型	物理性质				化学性质				
	pH	容重 /g·cm ⁻³	田间持水量/ %	凋萎含水量/ %	有机质 /g·kg ⁻¹	TN /g·g ⁻¹	TP /mg·kg ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N /mg·kg ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N /mg·kg ⁻¹
中壤土	8.08	1.31	29.8	8.5	13.8	0.00067	590.7	12.8	2.92

3 结果与讨论

3.1 岸边带去氮量空间分布模拟结果

对官厅水库库滨带在 2007 年 3~ 9 月氮元素的去除量进行模拟, 得到全流域的氮去除量空间分布, 如图 6 所示.

图 6 表明, 从官厅水库库滨带去氮量的空间分布上可以看出, 水域附近的滩地区域对氮去除量比较大, 中间人类活动明显区域的氮去除量小, 山地附近去除量较大; 从时间分布上可以看到, 6~ 8 月份氮去除量高于其他月份, 并在 8 月份达到最大, 值为 1.93 × 10³ t. 对模拟结果进行统计, 得到 3~ 9 月, 流域 N 去除总量为 5.89 × 10³ t.

3.2 模型结果验证

3.2.1 植物吸收的流域尺度验证

将模拟实验按照植被类型分为 3 个数据组, 分别为湿生群落组、草地组和草灌群落组, 依据生物量数据和 6~ 9 月的植物氮含量的测定结果, 按照公式 (7) 计算每个月的氮吸收负荷.

$$\Delta AR = B_2 \cdot C_2 - B_1 \cdot C_1 \quad (7)$$

式中, ΔAR 为植物对 N 的吸收负荷 (g·m⁻²); B₁ 和 B₂ 分别为上个月平均生物量和待计算月的平均生物量 (g·m⁻²); C₁ 和 C₂ 分别为 B₁ 和 B₂ 2 个月 N 平均含量 (g·g⁻¹).

对应 3 个野外试验组, 将湿地、滩地、草地和灌木 4 个土地利用类型的模拟结果进行处理, 得到植

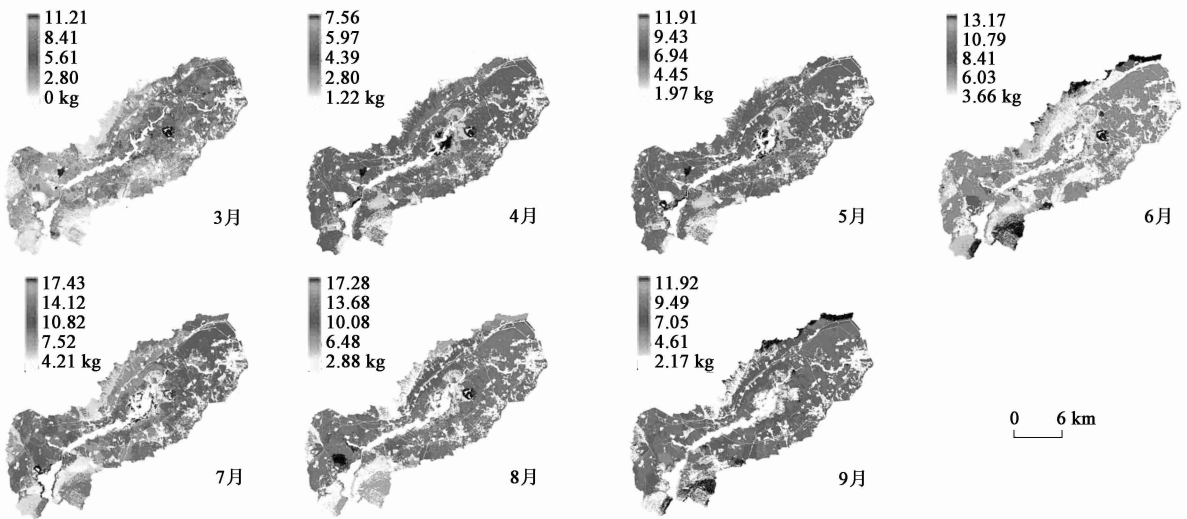


图 6 官厅水库库滨带流域对氮元素去除量空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of N removal loss in Guanting riparian catchment

物生长过程中对氮元素吸收负荷的模拟值与实验值, 并对模拟和实验结果进行相关性分析, 得到 3 个

群落组的决定系数 (R^2) 分别为 0.86、0.87 和 0.75 (图 7)。

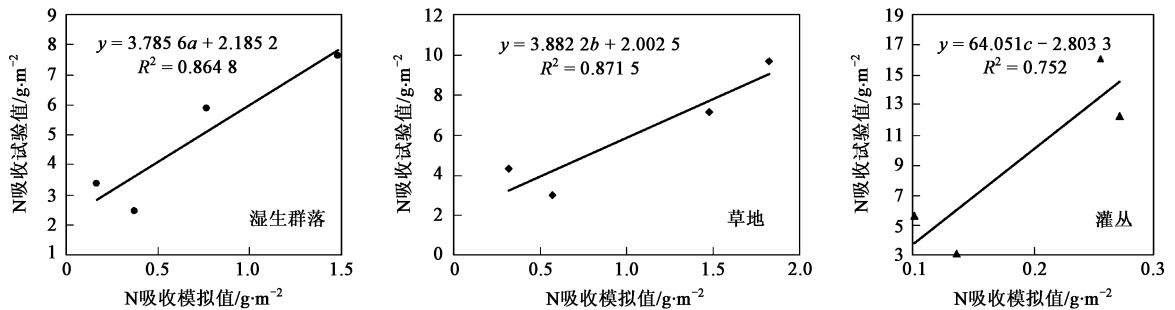


图 7 植物对氮元素吸收负荷的模拟值与试验值的相关分析

Fig. 7 Correlation analysis of N uptake between simulated values and experimental values

3.2.2 土壤释氮的流域尺度验证

应用总量法对土壤释氮负荷进行流域尺度验证, 检验模型为:

$$TN_{s0} - TN_{sn} = TN_p + TN_{sr} + TN_{sl} \quad (8)$$

式中, TN_{s0} 为土壤中初始的总氮量 (g), 即试验初期测定的土壤 TN 本底值; TN_{sn} 为 n 天后土壤中剩余的总氮量 (g), 即每个月测定的土壤样品中 TN 的平均值; TN_p 为 n 天后植被吸收的氮量 (g), 由植物生长期测定的 TN 浓度和植物生物量确定; TN_{sr} 为 n 天内土壤总的释氮量 (g), 即为 6~9 月份, 土壤硝化和反硝化释放的含 N 气体量; TN_{sl} 为 n 天内土壤中的淋溶的氮量 (g)。由于模拟实验的实验小区深为 1 m, 且与地下水切断, 在验证中忽略不计, 设为 0。

对土壤释氮的空间分布模拟结果进行统计分析, 得到以湿生群落为主的滩地和湿地类型、以草丛

为主的草地类型和以灌丛为主的灌木类型 3 种土地利用类型的流域尺度平均土壤月均释氮速率, 模拟值与实验值相关分析结果表明, 湿生群落组、草地组和草灌组 3 种植物群落组的决定系数 (R^2) 分别为 0.62、0.59 和 0.63, 具体结果见图 8。

综合 2 个模块的相关性分析, 表明 RIP_N 过程机制模型模拟趋势较好, 也证明了 RIP_N 模型对岸边带流域去氮模拟结果的可靠性, 但是, 受模拟尺度不同和实验样本数的限制, 模拟值 (流域尺度平均值) 和实验值 (田间尺度平均) 存在较大的绝对误差。因此, 对于模型在官厅水库库滨带的模拟精度需要采用野外定点监测方法进行点对点的进一步验证。

3.3 土地利用方式对库滨带去氮量的影响

将模拟结果按照土地利用方式进行统计, 得到林地、滩地、灌丛、草地和湿地 5 种不同土地利用方

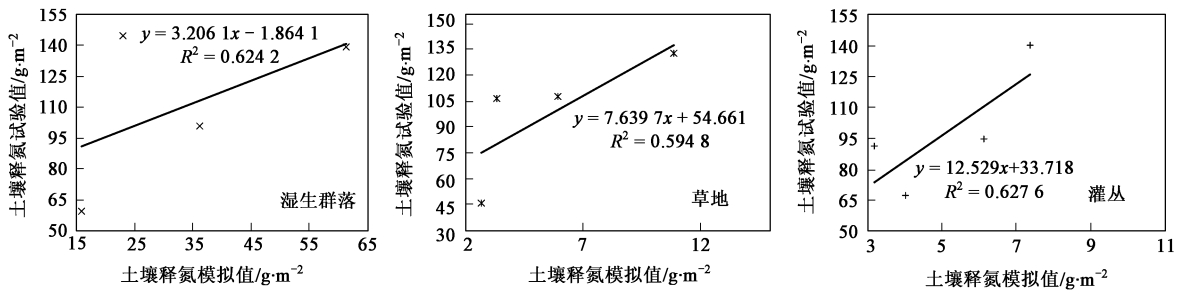


图8 土壤反应速率模拟值与试验值的相关分析

Fig. 8 Correlation analysis of soil N release between simulated values and experimental values

式下官厅水库库滨带的去氮量,去氮量的时间变化如图9所示。

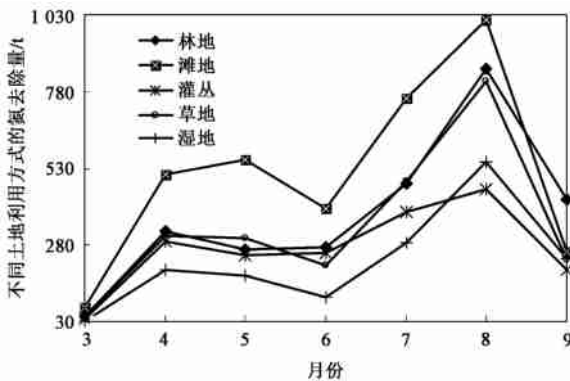


图9 不同土地利用方式下的N去除量月变化

Fig. 9 Monthly N removal under different land uses

图9表明:滩地类型最有利于N的去除,3~9月滩地对N的去除量为3572.8t,占天然植被去N量的29.5%;其次为林地和草地,总去N量分别为2663.9t和2395.6t,占天然植被去N量的22.0%和19.8%;灌丛去N量为1874.6t,占天然植被去N量的15.5%;湿地的总去N量值最小,为1588.4t,占天然植被去N量的13.1%。由此可见,官厅水库库滨带现状土地利用结构表明:滩地和林地是去污效果最佳的土地利用类型,同时,草地和灌丛在非点源污染防治方面也起到“汇”的作用,但是湿地的“汇”作用不明显。

4 结论

(1)官厅水库库滨带3~9月对N的总去除量为 5.91×10^3 t。

(2)依据野外模拟实验数据,采用总量平衡法对RIP_N模型模拟结果中的以草灌类型为主的土地利用方式进行验证,结果表明,模拟值与实验值具有很好的相关性,其中,植物对氮元素吸收模块,3个实

验组平均 R^2 为0.83;土壤释氮模块,3组平均 R^2 为0.61。相关分析结果表明RIP_N过程机制模型模拟趋势较好,也证明了RIP_N模型对岸边带流域去氮模拟结果的可靠性。

(3)受验证尺度不同和实验样本数的限制,官厅水库库滨带流域的模拟值(流域尺度平均)和实验值(田间尺度平均)存在一定的绝对误差。因此,对于模型在官厅水库库滨带的模拟精度需要通过更多的野外试验进行同尺度验证。

(4)RIP_N模型对官厅水库库滨带去氮的环境效益分析表明,在非点源污染防治方面,滩地是拦截N营养元素效果最佳的土地利用类型,3~9月岸边带流域的去N量占流域总去N量的29.5%;其次,林地、草地和灌木在非点源污染防治方面也起到“汇”的作用,总去N量分别占流域总去N量的22.0%、19.8%和15.5%;但是研究区中专属湿地的“汇”作用表现不明显,3~9月去N量占流域总去N量的13.1%。

(5)RIP_N模型的去氮环境效益分析结果表明:官厅水库库滨带的结构中一定的问题,首先应该适当增加湿地的面积,并保证湿地的可持续化管理,维护湿地的释氮机能;其次,适当减少农田和果园等人工植被的种植面积。模拟结果显示,这2种土地利用方式最有利于氮气的释放,同时总的含氮气体释放量也明显高于其他天然植被类型,也就是说这种库滨带结构存在着温室气体污染的隐患。

参考文献:

- [1] NRCS. Buffer strips: Common sense conservation[R]. Washington, D. C.:USDA Natural Resources Conservation Service, 1998. <http://www.nhq.nrcs.usda.gov/CCS/Buffers.html>.
- [2] 戴金水. 西沥水库构建生态库滨带的实践[J]. 中国水利, 2005, (6):32-34.
- [3] 潘继征, 李文朝, 陈开宁. 滇池东北岸生态修复区的环境效应——I. 抑藻效应[J]. 湖泊科学, 2004, 16(2):141-148.

- [4] 颜昌宙, 金相灿, 赵景柱. 湖滨带的功能及其管理[J]. 生态环境, 2005, **14**(2): 294-298.
- [5] 杨胜天, 王雪蕾, 刘昌明, 等. 岸边带生态系统研究进展[J]. 环境科学学报, 2007, **27**(6): 894-905.
- [6] Arnold J G, Williams J R, Srinivasan R, *et al.* SWAT, Soil and Water Assessment Tool[R]. USA: USDA, Agriculture Research Service, Grassland, Soil & Water Research Laboratory, 1994.
- [7] Krysanova V, Haberlandt U. Assessment of nitrogen leaching from arable land in large river basins Part I. Simulation experiments using a process-based model[J]. *Ecol Model*, 2002, **150**(3): 255-275.
- [8] Lowrance R R, Altier L S, Williams R G, *et al.* The riparian ecosystem management model simulator for ecological processes in riparian zones [A]. In: First Federal Interagency Hydrological Modeling Conference[C]. Las Vegas NV, 1998:19-23.
- [9] 雷志栋, 谢传森, 杨诗秀. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
- [10] Jones C A. CERES-Maize, a simulation model of maize growth and development [M]. USA: TEXAS A & M University Press, 1986. 79-90.
- [11] Molz F J, Irwin R. Models of water transport in the soil-plant system: a review [J]. *Water Resour Res*, 1991, **17**(5): 1245-1260.
- [12] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R. Soil and water assessment tool and water assessment tool (SWAT) theoretical documentation[E/OL]. chapter 01. 1 and chapter 05. 2. (<http://www.brc.tamus.edu/swat/doc.html>. 2008-9-5)
- [13] Heinen M. Simplified denitrification models: overview and properties [J]. *Geoderma*, 2006, **133**(3-4): 444-463.
- [14] Inamdar S P, Lowrance R R, Altier L S, *et al.* Riparian ecosystem management model (REMM): II. Testing of the water quality and nutrient cycling component for a coastal plain riparian system [J]. *Trans ASAE*, 1999, **42**: 1691-1707.
- [15] Grundmann G L, Rolston D E. A water function approximation to degree of anaerobiosis associated with denitrification [J]. *Soil Sci*, 1987, **144**(6): 437-441.
- [16] Xu C, Shaffer M J, Al-Kaisi M. Simulating the impact of management practices on nitrous oxide emissions [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1998, **62**: 736-742.
- [17] Kros H. Evaluation of biogeochemical models at local and regional scale [D]. Wageningen, Netherlands: Wageningen Agricultural University, 2002.
- [18] Li C S, Aber J. A process-oriented model of N₂O and NO emissions from forest soils: 1. model development[J]. *J Geophys Res*, 2000, **105**: 4369-4384.
- [19] 孙睿, 朱启疆. 陆地植被净第一性生产力的研究[J]. 应用生态学报, 1999, **10**(6): 757-760.
- [20] Arp P A, Oja T. A forest soil vegetation atmosphere model (ForSVA). I . Concepts [J]. *Ecol Model*, 1997, **95**(2-3): 211-224.
- [21] Arp P A, Oja T. A forest soil vegetation atmosphere model (ForSVA). II : Application to northern tolerant hardwoods [J]. *Ecol Model*, 1997, **95**(2-3): 245-247.
- [22] 朱文泉, 潘耀忠, 何浩, 等. 中国典型植被最大光利用率模拟[J]. 科学通报, 2006, **51**(6): 700-706.
- [23] 张佳华, 符淙斌. 生物量估测模型中遥感信息与植被光合参数的关系研究[J]. 测绘学报, 1999, **28**(2): 129-132.
- [24] Zhu Z X, Arp P A, Meng F R, *et al.* A forest nutrient cycling and biomass model (ForNBM) based on year-round, monthly weather conditions, part I : assumption, structure and processing [J]. *Ecol Model*, 2003, **160**(2-3): 347-360.
- [25] Zhu Z X, Arp P A, Meng F, *et al.* A forest nutrient cycling and biomass model (ForNBM) based on year-round, monthly weather conditions, part II : assumption, structure and processing [J]. *Ecol Model*, 2003, **170**(2-3): 13-27.
- [26] 王雪蕾, 杨胜天, 智泓, 等. 官厅水库库滨带非点源污染控制效应的遥感分析[J]. 环境科学学报, 2007, **27**(2): 304-312.
- [27] 杨胜天, 朱启疆, 李天杰. RS 和 GIS 支持下的土壤系统分类制图方法研究——以贵州省贵阳市为例[J]. 土壤学报, 2001, **38**(1): 41-48.
- [28] Hall F G, Strelak D E, Nickeson J E, *et al.* Radiometric rectification: toward a common radiometric response among multitemporal, multisensor images[J]. *Remote Sens Environ*, 1991, **35**: 11-27.
- [29] Liang S L. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I. Algorithms [J]. *Remote Sens Environ*, 2000, **76**: 213-238.
- [30] Tang S H, Zhu Q J, Wang J D, *et al.* Principle and application of three-band gradient difference vegetation index [J]. *Sci in China (Series D earth science)*, 2005, **48**(2): 241-249.
- [31] Bastiaansen W G M, Menenti M, Feddes R A, *et al.* A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) I formulation [J]. *J Hydrol*, 1998, **212-213**(12): 198-212.
- [32] 王树功, 黎夏, 周永章. 湿地植被生物量测定方法研究进展[J]. 地理与地理信息科学, 2004, **20**(5): 104-110.