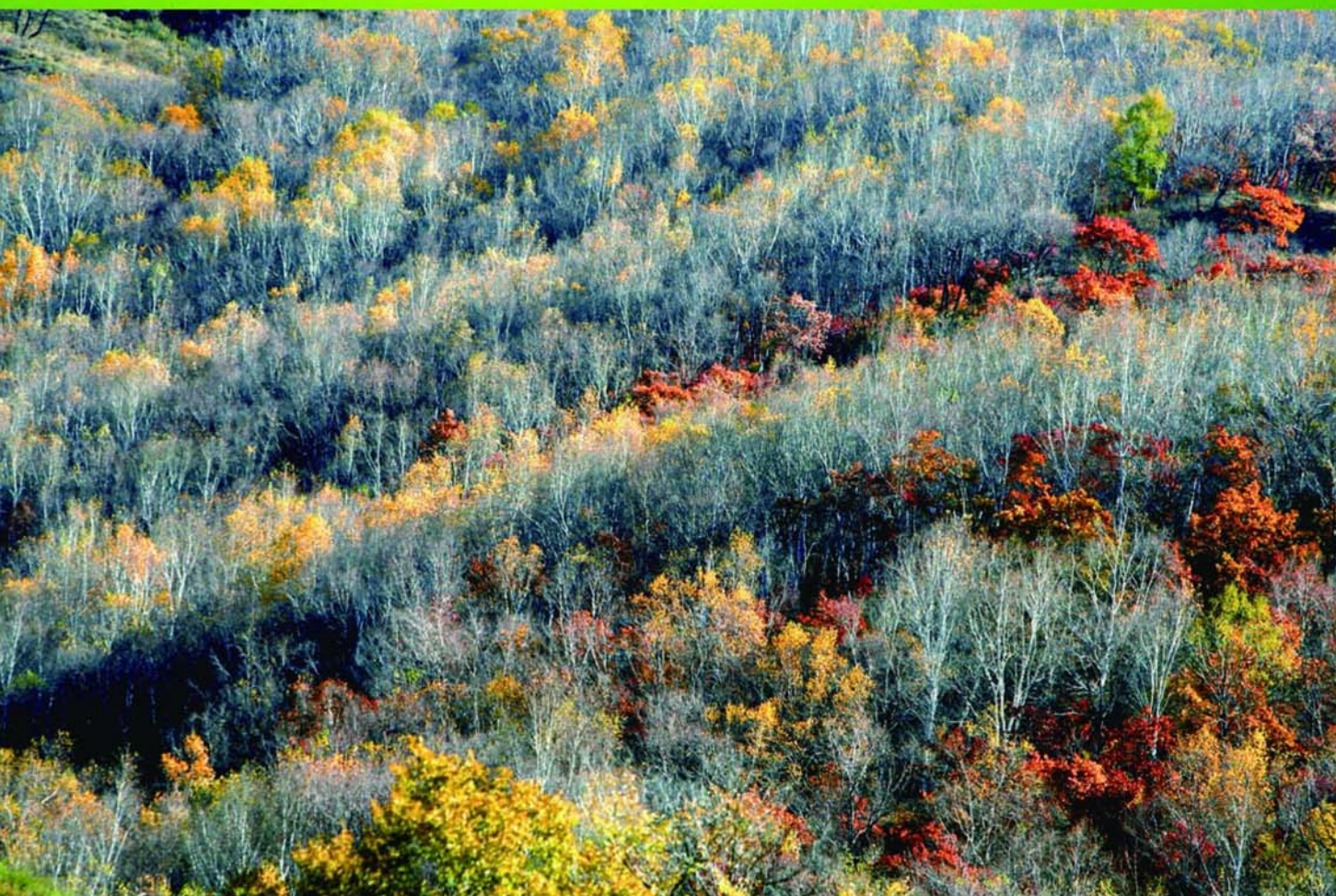


ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

# 生态学报

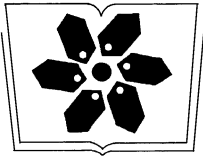
## Acta Ecologica Sinica



第31卷 第16期 Vol.31 No.16 **2011**

中国生态学学会  
中国科学院生态环境研究中心  
科学出版社

主办  
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

# 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 16 期      2011 年 8 月      (半月刊)

## 目 次

人工和天然湿地芦苇根际土壤细菌群落结构多样性的比较·····	汪仲琼,王为东,祝贵兵,等 (4489)
不同土壤水分下山杏光合作用光响应过程及其模拟·····	郎 莹,张光灿,张征坤,等 (4499)
不同颜色遮阳网遮光对丘陵茶园夏秋茶和春茶产量及主要生化成分的影响·····	秦志敏,付晓青,肖润林,等 (4509)
镉胁迫对烟草叶激素水平、光合特性、荧光特性的影响·····	吴 坤,吴中红,邵付菊,等 (4517)
条浒苔和缘管浒苔对镉胁迫的生理响应比较·····	蒋和平,郑青松,朱 明,等 (4525)
盐胁迫对拟南芥和盐芥莲座叶芥子油苷含量的影响·····	庞秋颖,陈思学,于 涛,等 (4534)
长期双季稻绿肥轮作对水稻产量及稻田土壤有机质的影响·····	高菊生,曹卫东,李冬初,等 (4542)
基于水量平衡下灌区农田系统中氮素迁移及平衡的分析·····	杜 军,杨培岭,李云开,等 (4549)
苏北海滨湿地互花米草种子特征及实生苗生长·····	徐伟伟,王国祥,刘金娥,等 (4560)
基于 AnnAGNPS 模型的三峡库区秭归县非点源污染输出评价·····	田耀武,黄志霖,肖文发 (4568)
镉污染对不同生境拟水狼蛛氧化酶和金属硫蛋白应激的影响·····	张征田,庞振凌,夏 敏,等 (4579)
印度洋南赤道流区水体叶绿素 a 的分布及粒级结构·····	周亚东,王春生,王小谷,等 (4586)
长江口滩涂围垦后水鸟群落结构的变化——以南汇东滩为例·····	张 斌,袁 晓,裴恩乐,等 (4599)
应用鱼类完整性指数 (FAII) 评价长江口沿岸碎波带健康状况·····	毛成贵,钟俊生,蒋日进,等 (4609)
基于渔业调查的南极半岛北部水域南极磷虾种群年龄结构分析·····	朱国平,吴 强,冯春雷,等 (4620)
水稻模型 ORYZA2000 在湖南双季稻区的验证与适应性评价·····	莫志鸿,冯利平,邹海平,等 (4628)
旱地农田不同耕作系统的能量/碳平衡·····	王小彬,王 燕,代 快,等 (4638)
宁夏黄灌区稻田冬春休闲期硝态氮淋失量·····	王永生,杨世琦 (4653)
太湖沉积物有机碳与氮的来源·····	倪兆奎,李跃进,王圣瑞,等 (4661)
日偏食对乌鲁木齐空气可培养细菌群落的影响·····	马 晶,孙 建,张 涛,等 (4671)
灰飞虱与褐飞虱种内和种间密度效应比较·····	吕 进,曹婷婷,王丽萍,等 (4680)
圈养马来熊行为节律和时间分配的季节变化·····	兰存子,刘振生,王爱善,等 (4689)
塔里木荒漠河岸林干扰状况与林隙特征·····	韩 路,王海珍,陈加利,等 (4699)
珍稀植物伯乐树一年生更新幼苗的死亡原因和保育策略·····	乔 琦,秦新生,邢福武,等 (4709)
垃圾堆肥复合菌剂对干旱胁迫下草坪植物生理生态特性的影响·····	多立安,王晶晶,赵树兰 (4717)
CLM3.0-DGVM 中植物叶面积指数与气候因子的时空关系·····	邵 璞,曾晓东 (4725)
基于生态效率的辽宁省循环经济分析·····	韩瑞玲,佟连军,宋亚楠 (4732)
<b>专论与综述</b>	
土壤食物网中的真菌/细菌比率及测定方法·····	曹志平,李德鹏,韩雪梅 (4741)
生态社区评价指标体系研究进展·····	周传斌,戴 欣,王如松,等 (4749)
<b>问题讨论</b>	
不同胁迫条件下化感与非化感水稻 PAL 多基因家族的差异表达·····	方长甸,王清水,余 彦,等 (4760)
<b>研究简报</b>	
钦州湾大型底栖动物生态学研究·····	王 迪,陈丕茂,马 媛 (4768)
人工恢复黄河三角洲湿地土壤碳氮含量变化特征·····	董凯凯,王 惠,杨丽原,等 (4778)
基于地统计学丰林自然保护区森林生物量估测及空间格局分析·····	刘晓梅,布仁仓,邓华卫,等 (4783)
晋西黄土区辽东栎、山杨树干液流比较研究·····	隋旭红,张建军,文万荣 (4791)
小兴安岭典型苔草和灌木沼泽 N <sub>2</sub> O 排放及影响因子·····	石兰英,牟长城,田新民,等 (4799)



封面图说: 在长白山麓低海拔地区的晚秋季节,成片的白桦林用无数根白色的树干、树枝烘托着林冠上跳动的金黄色叶片,共生的柞木树冠用更浓重的颜色显示了它的存在,整个山梁层林尽染,秋意浓浓。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

杜军, 杨培岭, 李云开, 任树梅, 王永忠, 李仙岳, 林艳. 基于水量平衡下灌区农田系统中氮素迁移及平衡的分析. 生态学报, 2011, 31(16): 4549-4559.

Du J, Yang P L, Li Y K, Ren S M, Wang Y Z, Li X Y, Lin Y. Nitrogen balance in the farmland system based on water balance in Hetao irrigation district, Inner Mongolia. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(16): 4549-4559.

## 基于水量平衡下灌区农田系统中氮素迁移及平衡的分析

杜 军<sup>1,2</sup>, 杨培岭<sup>1,\*</sup>, 李云开<sup>1</sup>, 任树梅<sup>1</sup>, 王永忠<sup>2</sup>, 李仙岳<sup>1</sup>, 林 艳<sup>3</sup>

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100081; 2. 宁夏农垦事业管理局, 宁夏银川 750001;

3. 内蒙古河套总局塔布渠管理所, 前旗 015000)

**摘要:**以河套灌区典型灌域(前旗北疙堵乡塔布村)为研究对象,通过分析农田系统中水量平衡和氮素平衡,建立农田系统中氮素平衡和水分平衡的联立模型,并用此模型分析典型区域内农田系统中氮素随水分迁移的规律。分析表明:应用水量和氮平衡模型分析灌区农田系统中氮迁移及平衡,可以反映出农业面源污染物(氮)在整个农田系统中的去向,化肥使用量的降低和灌水量的减少,将有效的减少农田系统中氮素的输入量;秋灌—秋浇期间,玉米、番茄和葵花作物对氮的吸收率分别为 17%、18% 和 32%,3 种土壤中残留量分别为 57%、60% 和 58%。依据河套灌区年施肥 60 万 t 计算,土壤残留量达到 17.2 万 t。在秋灌-秋浇期间从黄河引入的氮总量达到 1.21 万 t,随农田退水进入沟道的量为 840 t。

**关键词:**河套灌区; 农田系统; 氮素平衡; 水量平衡

## Nitrogen balance in the farmland system based on water balance in Hetao irrigation district, Inner Mongolia

DU Jun<sup>1,2</sup>, YANG Peiling<sup>1,\*</sup>, LI Yunkai<sup>1</sup>, REN Shumei<sup>1</sup>, WANG Yongzhong<sup>2</sup>, LI Xianyue<sup>1</sup>, LIN Yan<sup>3</sup>

1 College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100081, China

2 Bureau of Ningxia Farm, Yinchuan 750001, China

3 Hetao Irrigation District Tabu Channel Administration, Qianqi 015000, China

**Abstract:** The influence of human activity on the nutrition circulation has essentially changed ecosystem processes, and chemical fertilizers and nitrogen-fixing plants further enhanced the nitrogen flux in agricultural ecosystem. When the input of nitrogen exceeds the crop assimilation capacity, surplus nitrogen in the farmland system will lead to the increase of nitrate leaching, ammonia volatilize and denitrification, and result in negative influence on the environment. The amount of absorbed N by the crop is from 26% to 36% in farmland system, and the most of the surplus N is lost by the NH<sub>3</sub> volatilization and denitrification, and some of the surplus N leached into groundwater. Hetao irrigation district (HID) is one of the three large-scale irrigation districts in China, the fertilizers amount used in the farmland of HID is increasing during the past ten years. This paper conducted a case study on the transport and balance of nitrogen in the farmland system based on water balance in Hetao Irrigation District (HID), Inner Mongolia. The cycle process of nitrogen and water in the farmland system was analyzed and a coupled model of the nitrogen and water balance was set up, by which the nitrogen transport rule in the farmland system was analyzed.

The results showed that the coupled model could reflect the relationship between water and N in farmland system by application of water-balance and N balance. The model not only reflected the migration paths of N in the farmland system,

基金项目:水利部公益性行业专项经费项目(200701025);长江学者和创新团队发展计划(IRT0657);中国农业大学与内蒙古农业大学科研合作基金;中国农业大学研究生科研创新专项(kyex09113)

收稿日期:2010-07-13; 修订日期:2010-11-12

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangpeiling@126.com

but also explained which could effectively increase the utilization of the fertilizers and which could reduce agricultural non-point pollution contribution. It could reduce the production of the agricultural non-point pollution by increasing the amount of straw returning, and it could reduce the output amount of N in farmland system by reducing the fertilizer amount.

In autumn-irrigation period, the uptake rate of corn, tomato and sunflower is 17%, 18% and 32% respectively, and the soil residual rate is 57%, 60% and 58% respectively. In this period, the amount of N from the irrigation water is 12.1 thousand t, and the N discharge amount is 840 t. According to the fertilizer amount of 0.6 million t in year, the amount of soil residual of N is 0.17 million t. Because the fertilizer amount is higher and its utilization is lower, although the irrigation and drainage water amount is decreasing in the recent 10 years, the amount of N discharged into Wuliangsu Lake remains at about 330 t/a. So the effect of the agricultural irrigation non-point pollution of HID on the eutrophication of Wuliangsu Lake was significant.

**Key Words:** Hetao irrigation district; farmland system; nitrogen-balance; water-balance

人类对营养循环的影响从根本上改变了生态系统过程的规则,使用化肥和种植固氮植物进一步增强了农业生态系统氮通量。在中国农田生态系统中<sup>[1-2]</sup>:2004年农田生态系统通过挥发、反硝化、植株蒸腾、淋溶径流和侵蚀等途径损失的氮为1132.8万t,盈余在农田生态系统土壤中的氮为1301.2万t;与20世纪80年代相比,2002年由东北三省农田土壤总氮平衡和总磷平衡进入水体环境的氮、磷负荷均有所增加,各省农田进入水体环境氮、磷负荷的升高幅度分别为:辽宁,氮负荷29%,磷负荷3%;吉林,氮负荷93%,磷负荷229%;黑龙江,氮负荷39%,磷负荷125%。农田施肥被作物吸收仅有26%—36%,而盈余的64%—74%中极大部分是以氨挥发和反硝化产生气态氮的形式损失,部分以硝态氮淋失而进入地下水<sup>[3]</sup>。无论何种耕作制度,氮输入超过作物同化能力时,农田系统氮盈余,将导致硝态氮淋溶量、氨挥发量以及反硝化损失量等增加,并对环境产生影响<sup>[4]</sup>。

内蒙古河套灌区是中国三大灌区之一,农田化肥用量已由1978年的 $7 \times 10^4$ t迅速上升到2002年的 $52 \times 10^4$ t,2005年氮肥施用强度达到 $361.86 \text{ kg/hm}^2$ ,化肥利用率仅为30%<sup>[5]</sup>。多年年平均施肥量为59万t,氮、磷肥有效利用率为35%和22.4%。作物秸秆还田率不足30%。年经排干汇入乌梁素海的农田退水量为5.0亿 $\text{m}^3$ ,参与储备的总氮为329t,总磷为28t。近几年对河套灌区农田系统中氮素迁移转化研究表明:河套灌区内作物结构多样性有助于抑制氮的损失<sup>[6]</sup>,但是河套灌区农业化肥使用量的逐年增加,加重了灌区下游乌梁素海富营养化程度<sup>[7-10]</sup>;年内不同季节里农田系统氮素损失差异较大<sup>[7]</sup>,土壤表层(0—20cm)氮素含量在时间分布为4月份较高,11月份较低<sup>[8]</sup>。从化肥使用量、利用率和排泄量来看,化肥使用的逐年增高,使得河套灌区生态系统中氮通量逐年增高,农业面源污染加重;从近年来的研究结果来看,对灌区农田系统中氮的输入与输出平衡分析缺乏讨论。因此,本文通过选取典型灌排域(前旗北圪堵乡塔布村),以秋灌—秋浇期间区域内农田系统中的水循环为基础,分析农田系统中研究氮素平衡<sup>[11]</sup>。在区域尺度上分析农田系统中氮素随水分迁移的规律,以便为灌区农业面源污染防治提供相应的理论指导,为构建河套生态灌区以及保护乌梁素海湿地生态系统奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 灌区及典型试验区基本情况

内蒙古河套灌区是中国三大灌区之一,多年平均引水量50亿 $\text{m}^3$ ,年降水量为155—222mm,且集中在7—9月间,年蒸发量达2200—2400mm,蒸降比在10以上。在夏、秋分6次引水灌溉作物,10月份引水一次压盐保墒;灌区内的水循环过程为灌溉(降雨)—下渗—潜水蒸发类型,人工自然复合型的地表水系统是区域水循环中最关键、最积极的要素,影响农田尺度地下水-SPAC水分输送过程<sup>[12-14]</sup>。灌区内分布较多面积大小不等湿地和盐荒地,作物种植结构没有统一性。

试验区位于内蒙古乌拉特前期北圪堵乡庆华村北场社和邓存店村塔布社,乌拉特前旗西北方向,距乌拉

特前旗 30 km,五原县 25 km,东经 40°52'39.8"—40°53'53.5",北纬 108°32'32.2"—108°34'51.7"(图 1)。试验区东至 110 国道,南至河套灌区塔布分干渠,西至四支渠,北至乌拉特前期北圪堵乡公路,现有土地面积为 477 hm<sup>2</sup>,耕地 394 hm<sup>2</sup>,盐荒地 43 hm<sup>2</sup>,村庄 40 hm<sup>2</sup>,是农田灌排系统比较完善,农业种植成熟的区域,无工业点源污染。试验区农田退水全部由北场支沟排泄,且从南到北将试验区分为两片(东区为北场支渠灌溉,西区为左四支渠灌溉),近 3a 来,试验区主要种植葵花、玉米、番茄等。

## 1.2 数据收集方法

### 1.2.1 土壤与水体中氮收集方法

氮素平衡分析数据主要来自实际调查和定点定时(2009 年 6 月 25 日到 2010 年 4 月 25 日,图 1)采样化验后得到。调查数据包括渠道来水量(塔布渠管理所提供)、水利参数、气象资料(前旗气象局)、施肥量(表 1)、灌水量和作物种植面积(表 1)等数据。

表 1 试验区作物种植面积及施 N 量  
Table 1 Crop area and fertilization amount

作物 Crop	面积/hm <sup>2</sup> Area	氮肥/kg N fertilizer	吸收比 Uptake ratio	残留比 Residue ratio	氨挥发比 NH <sub>3</sub> volatilization ratio	N <sub>2</sub> O 释放比 N <sub>2</sub> O release ratio	排泄比 Draining ratio	浅水含量比 N amount in groundwater
葵花 Sun flower	290	91935	32	56	25	0.96	0.29	0.02
玉米 Maize	77	29920	17	52	29	0.97	0.24	0.02
番茄 Tomato	26	8250	18	60	20	0.96	0.29	0.02
盐荒地 Wasteland	43	0	0	0	0	0		
村庄 Town	39	0	0	0	0	0		
合计/平均 Sum/aver	477	130105	22	56	25	1	0.26	2

吸收比、残留比、NH<sub>3</sub>挥发比、N<sub>2</sub>O 释放比、排泄比和浅水含量比均为占总施氮量的百分比,由于误差引起百分比和值≈100

选取种植典型作物农田(图 1,玉米 4 个样点(7<sup>#</sup>、8<sup>#</sup>、13<sup>#</sup>、14<sup>#</sup>)、番茄地 4 个样点(1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>)和葵花地 5 个样点(3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>、12<sup>#</sup>、15<sup>#</sup>、16<sup>#</sup>),分布于左四斗沟两侧。)和盐荒地(1 个样点,位置为“N5”,图 1。)。在每个典型区中用 GPS 定点,以此点为圆心,以半径为 0.5 m 的区域为采样区域。根据河套灌区多年平均浅层地下水埋深 150—210cm,将试验区有效土壤剖面深度定为 160 cm。按照 0—20、20—40、40—80、80—120 和 120—160 cm 共 5 个层次,用土钻分层取出土样后,装入密封袋,在当天将土样(鲜土)送于巴彦淖尔市水利科学研究所化验分析土壤中硝态氮与铵态氮质量分数(表 2)。同步采集土样,利用烘干法测定土壤含水率,第 1 层和第 2 层为 0—10 和 10—20 cm,其它每个测定土层为 20 cm,总深度为 160 cm。采样时间:秋灌前(7 月 1 日),秋灌后(7 月 7 日,区域不同,秋灌的时间和灌水次数不同。),以后按照每月 15 号前后采样直至翌年 4 月 25 日(由于 11 月到翌年 3 月间是封冻和解冻期,所以 11 月到次年 2 月共 4 个时段土壤无法采集)。

**灌溉水取样** 在试验区引水口水面 25 cm 以下取 500 mL 水样,取样后立即将水样装入 PVC 瓶中,密封遮阳。在当天将水样送于巴彦淖尔市水利科学研究所化验分析水体中硝态氮与铵态氮含量(以下水样采集、保存和送样与此一致)。

浅层地下水取样采样点为“S、Z、X、N”加数字表示,如“S7”,共 22 个采样点(图 1),采样期为 2009 年 6 月 30 日到 2010 年 4 月 25 日。

排水沟中水样取样方法及时间同灌溉水取样,共设 3 个采样点(图 1)。北场支沟排水量测定利用 LS68

表 2 不同农田土壤剖面土壤质地分类

土壤剖面/cm Soil profile	番茄地 Tomato	葵花地 Sunflower	玉米地 Maize
0—20	砂土	砂土	壤土
20—40	砂土	砂壤土	黏土
40—80	壤土	壤土	黏土
80—120	黏土	黏土	黏土
120—160	砂土	黏土	黏土

砂土、壤土、砂壤土和黏土的容重分别为 1.52、1.50、1.48、1.54 g/cm<sup>3</sup>

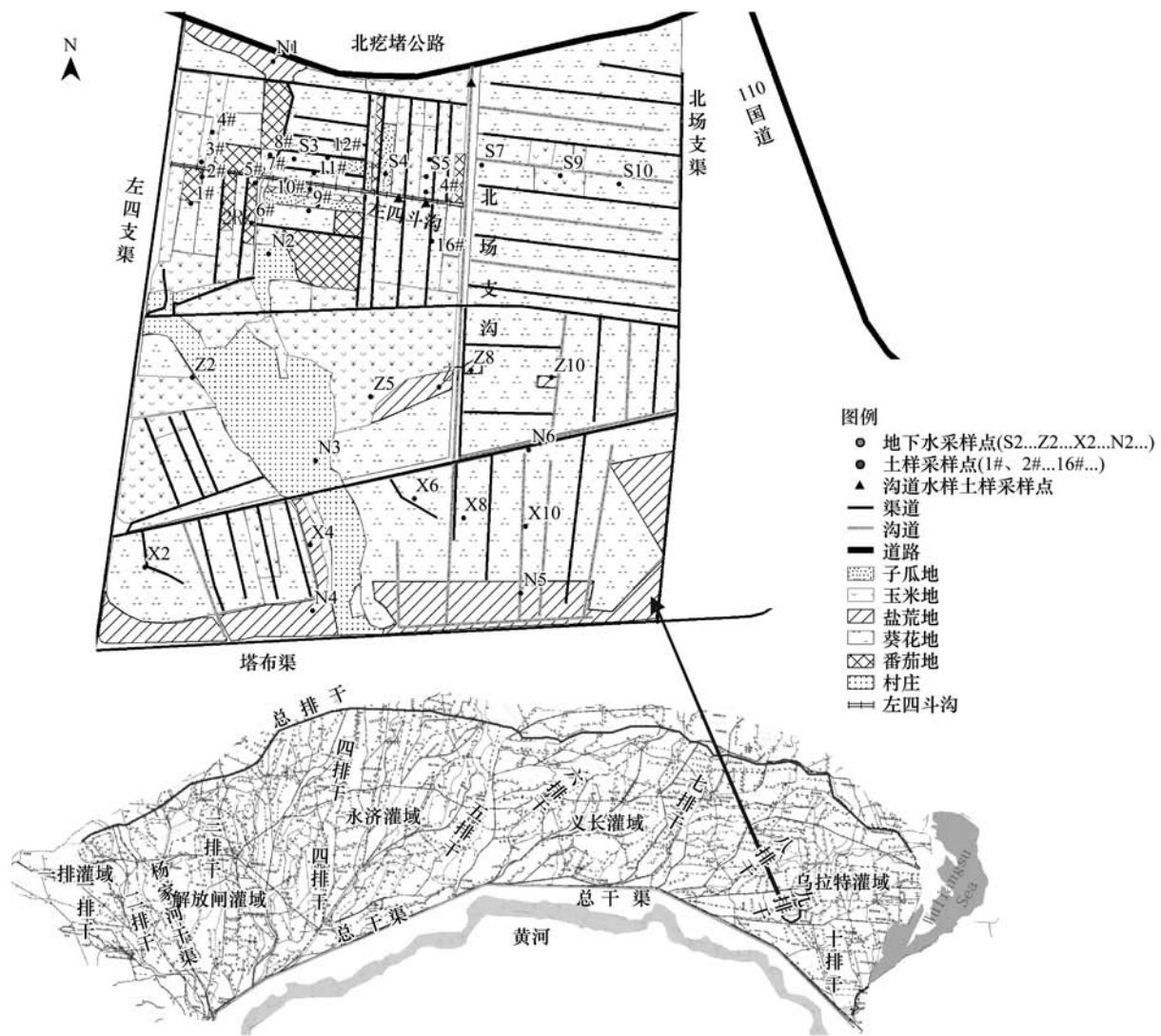


图1 试验区位置示意图

Fig. 1 Location of Study District

型旋杯式流速仪测定排水口(排水口为内径为45cm涵管)流速,然后乘以过水断面面积。测定时间自10月8日(10月6日开始秋浇。)8:00和20:00,连续观测5d,记录下流速与水深,回归水深与流速的关系式后,每3d测定排水口水深,直至封冻。

典型沟道边坡渗漏通量观测方法:在左四斗沟上下游各选择长50m、沟底宽2.5m、沟底至田面高差165cm、边坡为1/2.5的沟段(图1),并用土坝将典型沟段前后封堵。7月1日(秋灌开始,7月2日边坡开始渗漏水)将两段沟道中原有积水排干,使其渗漏水自然累积,每天8:00和20:00测定积水深度并收集水样,直至7月5日观测完毕后,再将沟道中积水排干。以5d为一个观测期,重复以上工作,直至8月15日(沟道已无积水)。

土地利用类型面积计算以1:10000试验区地形图为基础,利用GPS定位仪和GIS9.0软件分析绘制作物种植结构图和种植面积(图1)。首先利用GPS定位仪将各条沟道和渠道首尾坐标定位,对村庄、荒地和农田(不同作物)区域拐点处定位;然后将这些控制点坐标以点文件形式导入ArcGIS9.0软件中,绘制沟道与渠道,并计算其长度;勾画村庄、荒地和农田区域,并计算出各自面积(图1,表1)。

### 1.2.2 气态氮计算方法

DNDC (Denitrification-Decomposition, 反硝化-分解作用模型) 模型<sup>[15-16]</sup> 是目前国际上最为成功的  $N_2O$  释放机理模型之一, 该模型是反映农业土壤生态系统中 C、N 生物地球化学过程的模型, 主要模拟农业土壤尤其是旱田土壤的  $N_2O$  释放过程。DNDC 模型必须结合包括气候、土壤、农业活动和作物等输入参数的数据库后才能计算土壤的  $N_2O$  释放通量季节变化及区域农业土壤季或年的  $N_2O$  释放量。模型由 6 个子模型构成<sup>[17]</sup>, 分别模拟土壤气候、农作物生长、有机质分解、硝化、反硝化和发酵过程, 这些过程描述了土壤有机质的产生、分解和转化, 最后给出土壤碳和氮各组分动态含量和  $CO_2$ 、 $N_2O$ 、 $CH_4$ 、 $NO$ 、 $N_2$  等温室气体通量, 时间步长以日为单位。运行模型的输入参数包括逐日气象数据(气温及降水)、土壤性质(容重、质地、初始有机碳含量及酸碱度)、土地利用(农作物种类和轮作)和农田管理(翻耕、施肥、灌溉、秸秆还田比例和除草等), 点位模型只要根据种植情况输入数据, 便可进行多年模拟<sup>[17]</sup>。

由于没有关于河套灌区农田系统中  $NH_3$  挥发、 $N_2O$  释放和氮干湿沉降的实测资料可查。本文利用 DNDC 模拟软件中“Site 模型”, 以试验区作物施肥量、灌溉制度、农业管理制度、作物生物产量、试验区土壤属性、气候和地理位置为基础, 以 7 月 1 日、7 月 7 日、7 月 15 日、8 月 15 日和 10 月 1 日土壤剖面(0—50 cm)中硝态氮和铵态氮的积累量为校核值(图 2), 调整相关参数指标, 从而模拟获得 2009 年 7 月 1 日到 12 月 31 日期间试验区农田系统中  $NH_3$  挥发量、 $N_2O$  释放量和氮干湿沉降量分别占施氮量的 25%、1% 和 0.6‰。

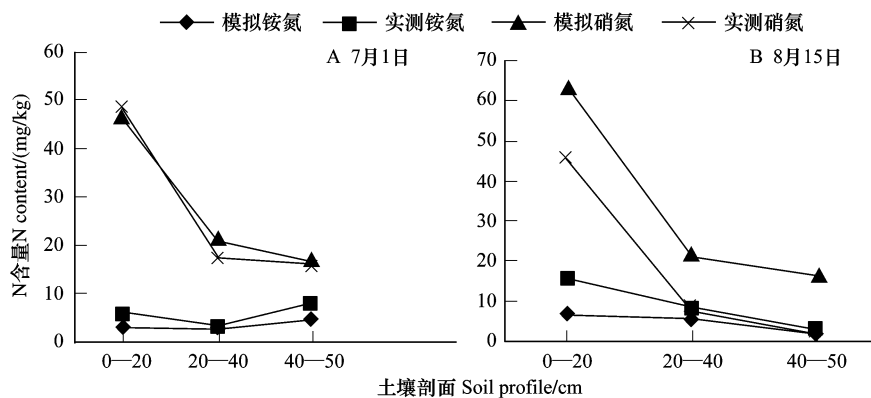


图 2 不同时期土壤剖面氮素积累实测值与模拟值

Fig. 2 Simulation and measured volume of N accumulation in soil profile indifferent period

## 1.3 模型建立

### 1.3.1 农田系统水量平衡模型

河套灌区水循环是大型灌区的陆地水循环模式, 它与一般的天然流域存在很大的不同, 它包含地表水、土壤水和地下水等水循环的全部要素, 以径流的人工控制和灌溉—蒸散为主的水文过程。试验区内浅层地下水的主要补给源为耕地面状渗漏和渠道线状渗漏, 浅层地下水埋深变化主要受到灌溉时间和量的影响(图 3)。夏灌后, 浅层地下水埋深从 152 cm(5 月 15 日)减小到 123 cm(6 月 15 日); 秋灌(灌水量为  $900-1100 m^3/hm^2$ , 灌溉体中  $NO_3^-$ -N 和  $NH_4^+$ -N 浓度分别为 2.43 和 1.33 mg/L。)后, 浅层地下水埋深从秋灌前(7 月 1 日) 140cm 减小到秋灌后(7 月 6 日)的 89 cm。进入 8 月后是作物蒸腾蒸发最旺盛的时期(番茄开始挂果成熟期, 玉米从抽穗到灌浆期, 葵花处于显蕾期。), 作物蒸腾蒸发量增强, 土壤含水量减少较快。在水势的作用下浅层地下水移补充土壤水分, 使得浅层地下水埋深逐渐增大到 230 cm(9 月 30 日)。秋浇(灌水量为  $1800-2000 m^3/hm^2$ , 灌溉水中  $NO_3^-$ -N 和  $NH_4^+$ -N 浓度分别为 2.50 mg/L 和 0.85 mg/L。)后, 浅层地下水埋深急速减小为 27 cm(11 月 15 日)。随着潜水蒸发和冻土层的增厚, 在水势的作用下, 水位埋深逐渐增大为 217 cm(翌年 2 月 15 日)。由于河套灌区多年年内平均浅层地下水埋深为 155—200 cm 之间, 而沟道(支斗沟)底部与农田田面平均高差为 170 cm。因此, 浅层地下水的消耗除了蒸腾蒸发外, 还主要是以浅层地下水的水平迁移进

入沟道而进入(图4)。

因此,建立以试验区内灌水量和降雨量为输入项,以浅层地下水水量变化、沟道积水、蒸腾蒸发和土壤水分变化为主的输出项的水量平衡模型:

$$Q_i + Q_p = \Delta Q_g + Q_d + Q_e + \Delta Q_s + ET_c \quad (1)$$

式中,  $Q_i$  时段内引水量( $m^3$ );  $Q_p$  时段内降雨量( $m^3$ );  $\Delta Q_g$  时段内地下水变化量( $m^3$ );  $Q_d$  时段内排水沟中水量的变化量( $m^3$ );  $Q_e$  时段内地下水开采量( $m^3$ );  $\Delta Q_s$  时段内土壤含水量的变化量( $m^3$ );  $ET_c$  时段内蒸腾蒸发量( $m^3$ )。

本文利用典型沟道单位时间内边坡渗漏量计算出试验区在秋灌期排水量占灌溉量的 3.2%。测得试验区秋浇期(2009 年 10 月 10 日到 12 月 10)排水量占总灌溉量的 12.5%。试验区在秋灌到秋浇期间总排水量占总灌溉量的 10.1% (灌区总排干年平均排水量占灌区总灌溉量的 9.5%)。因此,  $Q_d = 0.101 \times Q_i$ 。

按照试验区渠系水利用系数  $\eta_{渠} = \eta_{支} \times \eta_{斗} \times \eta_{农} = 0.582$  计算出灌溉期浅层地下水补给量  $\Delta Q_g = (1 - \eta_{渠}) \times Q_i$ 。

由此,式(1)转化为:

$$Q_i + Q_p = 0.42Q_i + 0.10Q_i + Q_e + \Delta Q_s + ET_c \quad (2)$$

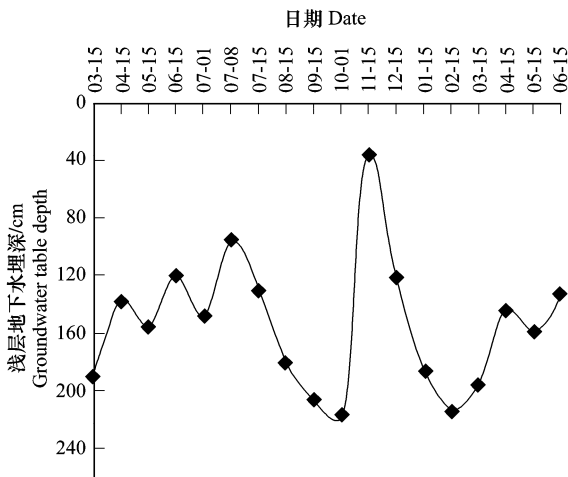


图3 年内浅层地下水埋深变化

Fig.3 Variation of groundwater water depth

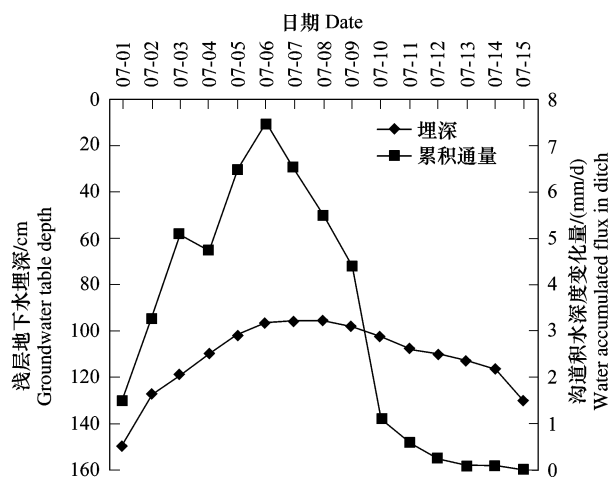


图4 时段内浅层地下水埋深与沟道积水深度变化

Fig.4 Variation of groundwater table depth and ditch water depth

### 1.3.2 农田系统氮平衡模型

土壤中的氮来源不仅有微生物固定分子  $N_2$  和农田肥料的施用而获得,而且干湿沉降、灌溉水能将氮带也入土壤中<sup>[18-19]</sup>。在作物生育期内氮的输入量  $N_T$  (为了方便分析,现将土壤(0—160 cm)中的氮含量规定为输入量。)用式(3)表示:

$$N_T = N_i + N_f + N_s + N_{dwd} \quad (3)$$

式中,  $N_T$  总氮量(kg);  $N_i$  灌溉水带入量(kg);  $N_f$  化肥施入量(纯氮)(kg);  $N_s$  时段初土壤中氮素含量(kg);  $N_{dwd}$  氮的干湿沉降量(kg)。

农田系统中氮素的输出量包括:时段末土壤残留量(与时段初对应)、 $NH_3$  挥发、 $N_2O$  释放、作物吸收量、淋洗量、随地下水开采量(由于地下水开采量主要是当地塔布村部分居住居民生活和牲畜用水,无工业开采量,所以浅层地下水开采项可以忽略。)、排水沟中累积量。所以,根据物质流分析的原理,即物质守恒定律:养分的“输入=输出+盈余”,式(3)变为:

$$N_T = N'_s + N_d + N_g + N_{up} + N_{NH_3} + N_{N_2O} \quad (4)$$

$$N_i + N_f + N_s + N_{dwd} = N'_s + N_d + N_g + N_{up} + N_{NH_3} + N_{N_2O} \quad (5)$$



式中,  $N'_s$  时间段内末土壤中 N 素含量 (kg);  $N_d$  时段内沟道中 N 素的量 (kg);  $N_g$  时段内淋洗到浅层地下水中的量 (kg);  $N_{\text{NH}_3}$  时段内以  $\text{NH}_3$  挥发损失量 (kg);  $N_{\text{N}_2\text{O}}$  时段内以  $\text{N}_2\text{O}$  损失量 (kg);  $N_{\text{up}}$  时段内植物吸收量 (kg)。为了更好的反映出农田系统中氮与水分的关系, 本文采用半经验的根据根系吸水量和土壤中  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度估算氮素的吸收量, 所以  $N_{\text{up}} = C_n \lambda S^{[20-21]}$ , 式中  $S$  为根系吸水量 ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ ),  $S$  的计算采用将蒸腾量按比例分配根层的计算方法, 即计算出作物的潜在蒸腾量后, 按照计算出阶段内作物的实际蒸腾量, 再将蒸腾量根据影响根系吸水率因素或经验分布规律按比例分配到根层的不同深度。

式(5)中左边各项可用以下各式计算:

$$N_i = Q_i C_i \quad (6)$$

$$N_s = \sum_j^n M_j C_{s_j} \quad (7)$$

$$N_{\text{dwd}} = 0.000062 N_f \quad (8)$$

式中,  $C_i$  为灌溉水中氮素的浓度 (mg/L);  $M_j$  为计算土层的重量 (kg);  $C_{s_j}$  为不同土层在时段初 N 素的浓度 (mg/kg)。

式(5)中右边各项可用以下各式计算:

$$N'_s = \sum_j^n M_j C'_{s_j} \quad (9)$$

$$N_d = 0.101 Q_i C_d \quad (10)$$

$$N_g = Q_i (1 - \eta_{\text{渠}}) C_g \quad (11)$$

$$N_{\text{up}} = \bar{C}_{s_j} \cdot \lambda \cdot (-0.21 + 0.70 \text{LAI}^{1/2}) \cdot ET_c \cdot \frac{\Delta\theta_j}{\Delta\theta} \quad (12)$$

$$N_{\text{NH}_3} = 0.25 N_f \quad (13)$$

$$N_{\text{N}_2\text{O}} = 0.01 N_f \quad (14)$$

式中,  $C'_{s_j}$  为不同土层在时段末 N 素的浓度 (mg/kg);  $j$  为土层编号;  $n$  为土层总数;  $\bar{C}_{s_j}$  为不同土层 N 素在时段内的平均浓度 (mg/kg);  $C_d$  时段内沟道水体中 N 素浓度 (mg/L);  $C_g$  时段内浅层地下水中 N 素浓度 (mg/L);  $\lambda$  根系吸收氮素的吸收系数, 取 0.8;  $\text{LAI}$  为作物叶面积指数;  $ET_c$  为时段内作物潜在蒸腾量;  $\Delta\theta_j$  单个土层中土壤含水率变化量;  $\Delta\theta$  计算土壤剖面中含水量的总变化量。

由式(1)~(14)联立, 建立农田系统中水量平衡和氮素平衡的联立模型, 即:

$$Q_i C_i + \sum_j^n M_j C_{s_j} + N_f + 0.000062 N_f = \sum_j^n M_j C'_{s_j} + 0.101 Q_i C_d + Q_i (1 - \eta_{\text{渠}}) C_g + \bar{C}_{s_j} \lambda (-0.21 + 0.70 \text{LAI}^{1/2}) ET_c \frac{\Delta\theta_j}{\Delta\theta} + 0.2 N_f + 0.01 N_f \quad (15)$$

依据式(15)计算时, 将同种作物不同采样点的相关值以平均值计算。由于本文从 7 月 1 日 (此时玉米和番茄进入生育期中期, 葵花进入幼苗期) 开始采样, 式(15)中  $\sum_j^n M_j C_{s_j} + N_f$  项为时段初土壤中氮含量 (表 3)。

## 2 结果与分析

### 2.1 浅层地下水中氮素的变化

从秋灌 (7 月 1 日) 到翌年 4 月份, 浅层地水平均埋深为 150 cm, 且埋深出现了 2 个峰值和 2 个谷值 (图 3)。水位的波动对土壤中氮素的影响很明显, 随之也影响着浅层地下水中氮素浓度变化 (图 5)。秋灌后, 浅层地下水中氮素浓度稍有上升 (图 5),  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N 质量分数从秋灌前 (7 月 1 日) 0.01 mg/L 和 1.28 mg/L 上升到秋灌后的 0.33 mg/L 和 1.88 mg/L (8 月 15 日), 随着氮素之间的转化和浅层地下水蒸发, 2 者浓度又下降到秋浇前的 0.12 mg/L 和 1.44 mg/L (10 月 1 日)。秋浇后, 大量的  $\text{NO}_3^-$ -N 被淋洗到浅层地下水中。同

时,由于秋浇水量特大,增加了浅层地下水中泥沙和有机质含量(观测井中目测),也就随之增加了浅层地下水中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度(吸附态氮和有机质的矿化。)。因此,浅层地下水中两中氮素质量分数上升幅度较大(由于  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  化学性质的差异,浅层地下水中两者最大质量分数出现的时间不同),分别为 0.90 mg/L(11 月 15 日)和 3.75 mg/L(12 月 15 日)。从图 4—图 6 看出,沟道水体中 N 浓度随着浅层地下水水位上升和渗漏通量的增大而增大,反之亦然。主要原因在于浅层地下水的侧流和土壤水的侧渗将大量的氮素带入沟道中。综上所述,从秋灌和秋浇后的浅层地下水中氮素质量分数的增加幅度来看,秋浇是河套灌区产生农业面源最严重的时期。

表 3 试验区农田系统中氮素平衡/kg  
Table 3 N balance in the farmland system/kg

作物 Crop	输入项 Input item			输出项 Output item						误差 Error	
	引入量 Irrigated amount	土壤含量 Content in soil	沉降量 Deposition	吸收量 Uptake amount	残留量 Residue	氨 $\text{NH}_3$	氧化亚氮 $\text{N}_2\text{O}$	排泄量 Drain amount	浅水含量 N amount in groundwater	绝对 Absolute	相对 Relative
葵花 Sunflower	3657	96741	6	30750	53253	22984	919	282	2098	-9881	-0.10
玉米 Maize	976	28362	2	5451	16161	7480	299	75	560	-687	-0.02
番茄 Tomato	327	8761	1	1552	5164	2063	83	25	188	15	0.00
荒地 Wasteland		3636	0	0	6126	0	0	0	0	0	0.00
合计 Sum	4961	133864	8	37753	74578	32526	1301	382	2845	-10553	-0.08

2.2 农田系统氮平衡分析

作物的生育性状的差异直接导致田间施肥和土壤中残留量的不同。从表 2 中看出,玉米地单位施氮量较高,番茄和葵花的相近;地土壤中残留比是玉米<葵花<番茄,而吸收比却是玉米≈番茄。这种土壤残留比和吸收比的差异,正反映出玉米的生育期长,且灌溉量和灌水次数均高于葵花和番茄。同时,氨挥发比和  $\text{N}_2\text{O}$  释放比相对较大,也说明施肥量和灌溉量较大时,产生的农业面源氮污染较严重。

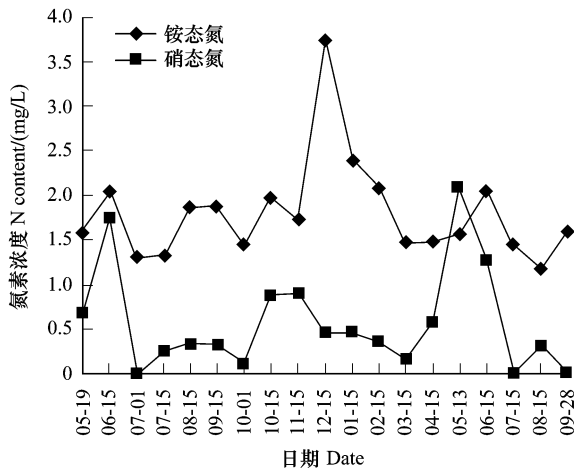


图 5 地下水中氮素浓度变化

Fig. 5 Variation of N content in groundwater

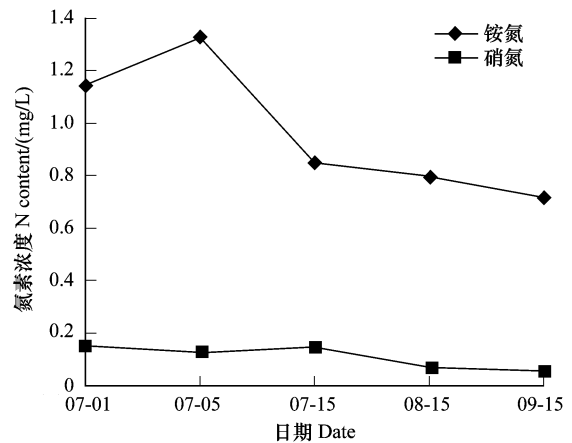


图 6 沟道水体氮素浓度变化

Fig. 6 Variation of N content in ditch water

从试验区整体考虑,在秋灌—秋浇期间试验区农田系统中作物吸收量、时段末土壤残留量、 $\text{NH}_3$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、沟道排泄量和淋洗量分别占总施氮量的 22%、57%、25%、1%、0.3% 和 2% (表 2,由于土壤原有氮量较高,百分比和值≈100)。试验区农田系统中阶段内氮通量的增高,主要是由于农业化肥的施用。尽管试验区由灌溉引入的无机氮为 4961 kg(表 3),但按照河套灌区当年秋灌—秋浇期间总引水量计算而引入的无机氮总量达到 1.21 万 t。从河套灌区农业面源污染物负荷分析,秋灌—秋浇期间,作物吸收量仅占总施氮量的 22%,施

肥量的 57% 残留在了土壤中,随农田退水排出试验区的氮为 0.26%。若按照河套灌区当年当季总农田退水计算将有 840 t 氮脱离农田而进入沟道中,直接影响下游乌梁素海生态环境(由于水生植物对氮的截留和吸收,消耗了大部分氮,进入乌梁素海的氮量相对较低)。

### 3 讨论

#### 3.1 灌区污染潜势分析和防治

对灌区农田系统氮平衡分析可知,土壤中氮的残留量、淋溶量和沟道排泄量与氮素的输入量和灌溉量有密切的关系。农田中施肥量的增加导致农田系统中氮通量的增高,而灌溉量和灌水次数的增多又是农田系统中氮损失的诱导因素。河套灌区年平均施肥量为 59 万 t(氮、磷肥有效利用率为 35% 和 22.4%),灌水次数达到 7 次,必然导致农业面源污染的加重。近 10 a 的节水灌溉的实施,年均引水量下降为 44.5 亿  $\text{m}^3$ ,排干汇入乌梁素海的农田退水量降为 4.5 亿  $\text{m}^3$ ,而参与储备的总氮为 330 t 左右。据李畅游对乌梁素海富营养化主控因子年季变化分析发现乌梁素海上浮水中主要的氮素形态为  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ <sup>[10]</sup>,且湖水中氮和磷的增加主要原因是上游河套灌区多年来化肥的使用量逐渐增加<sup>[10-11]</sup>。从农田系统氮平衡分析可知,浅层地下水和沟道水体中氮素主要形态也是  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 。从这一点上分析,河套灌区的农业面源污染对下游乌梁素海富营养化有着显著的影响。朱兆良曾指出目前氮污染高风险地区在中国东南沿海的 7 个省(市)和中部的湖北省,按照目前趋势如不加以控制,预计到 2010 年除江西、山西外,中国东部及东南部地区 15 个省(市)将全面进入氮污染高风险区域<sup>[22]</sup>。有研究<sup>[22]</sup>显示,内蒙古等地区的氮污染负荷量呈“低风险”,但是从目前河套灌区施肥量的增高且利用率较低,乌梁素海多次的赤潮和黄藻的发生来看,灌区的农业面源污染治理刻不容缓。

在河套灌区秋收后作物秸秆还田比例不足 30%,大部分秸秆被焚烧或废弃在沟道和荒地中,无形中增加了有机肥的损失(这也是国内目前有机氮养分资源利用率不高一个重要原因<sup>[23]</sup>)。由于有机氮肥能对化学氮肥中易淋失的氮素养分吸附和保存,减少氨挥发的气态损失和淋溶损失,同时化学氮肥的施用能补充有机氮肥肥效缓慢的缺点。因此充分利用有机养分,且注重有机氮肥和化学氮肥的配合施用是降低河套灌区农田生态系统氮养分污染潜势的重要途径。

#### 3.2 参数取值

运用农田生态系统养分平衡模型进行农田养分输入、输出和盈余估算一个很重要的问题就是参数的选取,为了保证得到的参数更可靠,本研究较多的采用实测值。对于一些灌区没有实测资料可参考的参数,采用权威参数值选取,特别是应用 DNDC 软件来分析气态氮的量素。目前世界上已有很多国家的科学家在使用 DNDC 模型来进行应用研究<sup>[17]</sup>,如模拟分析意大利和德国的水稻田、加拿大的麦田等农田的碳氮循环和英国洛桑 100 多年试验田的土壤有机质动态等。该模型已在不同气候带、不同土地类型和不同种植方式下,对温室气体如  $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CH}_4$  的排放特征、土壤有机碳的变化特征等进行了大量的模拟,其科学性也已被广泛证实。由于灌区农业种植结构统一性较差,没有应用软件中的“region”模型,而采用“site”模型计算出作物生长期期间产生气态氮通量。目前,没有关于河套灌区农田系统中氮干湿沉降、氨挥发和  $\text{NO}_x$  释放的实测资料可查,对相关的科研工作有较大的影响。因此,在今后的相关科研中,应增加对河套灌区氨挥发和  $\text{NO}_x$  释放等值的监测。

关于作物吸收氮量的计算,该研究为了使式(15)中更好的反映出氮与水分的关系而采用半经验的根据根系吸水量和土壤中  $\text{NO}_3^--\text{N}$  浓度估算氮素的吸收量,增加了应用参数。

### 4 结论

(1)从农田系统水量平衡和氮平衡共同应用分析灌区农田系统中氮平衡,不仅较好的反映出农业面源污染物(氮)在整个农田系统中的流向,而且更好的说明在系统中那些项的变化可以有效增加养分利用率,那些项的变化可以减少农业面污染物的贡献。

(2)秋灌—秋浇期间,玉米、番茄和葵花作物对氮的吸收率分别为 17%、18% 和 32%,土壤中残留量分别为 57%、60% 和 58%。依据河套灌区年施肥 60 万 t 计算,土壤残留量达到 17.2 万 t。在秋灌—秋浇期间从黄

河引入的氮总量达到 1.21 万 t,随农田退水进入沟道的量为 840 t。

(3) 由于灌区农田系统年施肥量较大,而化肥的利用率较低。虽然近 10a 来灌区的引水和排水均减少的情况下,但是进入乌梁素海的氮任保持在 330t 左右。化肥使用量的降低和灌水量和次数的减少,将有效的减少农田系统中氮素的输入量。同时,加强秸秆还田等有机养分的使用,将有效的减少农业非点源污染物的产生。

#### References:

- [ 1 ] Wang J Q, Ma W Q, Jiang R F, Zhang F S. Development and application of nitrogen balance model of agro-ecosystem in China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(8): 210-215.
- [ 2 ] Cao N, Qu D, Chen X P, Zhang F S. Analysis of the contribution to non-point pollution made by balanced fertilizer in Northwest China. *Jour of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry: Natural Science Edition*, 2006, 34(7): 127-133.
- [ 3 ] Zhang W L, Xu A G, Ji H J, Kolbe H. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies III. A review of policies and practices for agricultural non-point source pollution control in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(7): 1026-1033.
- [ 4 ] Zhang Y M, Hu C S, Zhang J B, Li X X, Dong W X. Nitrogen cycling and balance in agricultural ecosystem in piedmont plain of taihang mountains. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(1): 5-11.
- [ 5 ] Wei G X, Sun J C, Zhu F. Agricultural area-source pollution status and prevention countermeasures of riverain irrigated regions in Inner Mongolia. *Soil and Water Conservation in China*, 2009, (8): 27-29.
- [ 6 ] Feng Z Z, Wang X K, Feng Z W, Liu H Y, Li Y L. Influence of autumn irrigation on soil N leaching loss of different farmlands in Hetao irrigation district, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10): 2028-2035.
- [ 7 ] Feng Z Z, Wang X K, Feng Z W. N pollution of groundwater in Hetao irrigation district. *Rural Ecoenvironment*, 2005, 21(4): 74-76.
- [ 8 ] Zeng A Y, Hao F H, Zhang J X, Ouyang W, Zhang M X, Tian W J. Nitrogen & phosphorus losses caused by the summer & fall irrigation runoff in the agricultural irrigation area in Inner Mongolia. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(5): 838-844.
- [ 9 ] Hao F H, Ouyang W, Li P, Zeng A Y, Yue Y. Temporal and spatial variability of nitrogen in soil in the Wulate irrigation district of the Hetao irrigation area in Inner Mongolia. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(5): 845-852.
- [ 10 ] Li C Y, Liu T X, Gao R Z, Ren C T. Study and synthetic assessment for the season-year change of the eutrophication main-control factors in Wuliangshai lake. *Hydrology*, 2004, 24(3): 14-18.
- [ 11 ] Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W, Bekunda M, Cai Z C, Freney J R, Martinelli L A, Seitzinger S P, Sutton M A. Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions. *Science*, 2008, 320(5878): 889-892.
- [ 12 ] Hao F H, Ouyang W, Yue Y, Yang Z F, Li P. Analysis of water cycle characteristics and soil water movement in the agricultural irrigation area in Inner Mongolia. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(5): 825-831.
- [ 13 ] Wang X S, Yue W F, Yang J Z. Analysis on water cycling in GSPAC system of Tetao-irrigation district, in Inner Mongolia, China. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2004, 23(2): 3-6.
- [ 14 ] Yang J F, Li B Q, Li Y S, Ma R, Hong J X. Preliminary studies on groundwater effects on SPAC system in shallow groundwater field. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999, (7): 27-32.
- [ 15 ] Li C S, Frolking S, Harriss R. Modeling carbon biogeochemistry in agricultural soils. *Global Biogeochem Cycles*, 1994, 8(3): 237-254
- [ 16 ] Christina T, David M B, Li C S, Drinkwater L E. Application of the DNDC model to tile-drained Illinois agroecosystems: model comparison of conventional and diversified rotations. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2007, 78(1): 65-81.
- [ 17 ] Qiu J J, Li H, Wang L G. Simulation of nitrogen level and balance in cropland in China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(8): 40-44.
- [ 18 ] Shen J L, Liu X J, Zhang F S. Atmospheric dry depositions of ammonia and nitrogen dioxide to agricultural fields in perisuburbs of Beijing. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(1): 165-199.
- [ 19 ] Zhu Z L. Research on soil nitrogen in China. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 775-783.
- [ 20 ] Kang S Z, Xiong Y Z. A method of calculating evapotranspiration from the farmland with soil water deficit in arid and semiarid areas. *Acta Geographica Sinica*, 1990, 45(4): 476-484.
- [ 21 ] Yang P L, Hao Z Y. Developments of plant root uptake models. *Journal of China Agricultural University*, 1999, 4(2): 67-73.
- [ 22 ] Zhu Z L, Sun B, Yang L Z, Zhang L X. Policy and countermeasures to control non-point pollution of agriculture in China. *Science and Technology Review*, 2005, 23(4): 47-51.

- [ 23 ] Yin J, Fei L J, Tian J C, Wang Y F, Han B F, Zhang X K, Mian S J. Research advance of nitrogen fertilizer losses from paddy field. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(6): 189-191.

#### 参考文献:

- [ 1 ] 王激清, 马文奇, 江荣风, 张福锁. 田生态系统氮素平衡模型的建立及其应用. 农业工程学报, 2007, 23(8): 210-215.
- [ 2 ] 曹宁, 曲东, 陈新平, 张福锁. 东北地区农田土壤氮、磷平衡及其对面源污染的贡献分析. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34(7): 127-133.
- [ 3 ] 张维理, 徐爱国, 冀宏杰, Kolbe H. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 III. 中国农业面源污染控制中存在问题分析. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1026-1033.
- [ 4 ] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 李晓欣, 董文旭. 太行山前平原农田生态系统氮素循环与平衡研究. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(1): 5-11.
- [ 5 ] 魏国孝, 孙继成, 朱锋. 内蒙古河套灌区农业面源污染及防治对策. 中国水土保持, 2009, (8): 27-29.
- [ 6 ] 冯兆忠, 王效科, 冯宗炜, 刘宏云, 李延林. 河套灌区秋浇对不同类型农田土壤氮素淋失的影响. 生态学报, 2003, 23(10): 2028-2035.
- [ 7 ] 冯兆忠, 王小可, 冯兆伟. 河套灌区地下水氮污染状况. 农村生态环境, 2005, 21(4): 74-76.
- [ 8 ] 曾阿妍, 郝芳华, 张嘉勋, 欧阳威, 张敏霞, 田伟君. 内蒙古农业灌区夏、秋浇的氮磷流失变化. 环境科学学报, 2008, 28(5): 838-844.
- [ 9 ] 郝芳华, 欧阳威, 李鹏, 曾阿妍, 岳勇. 河套灌区不同灌季土壤氮素时空分布特征分析. 环境科学学报, 2008, 28(5): 845-852.
- [ 10 ] 李畅游, 刘廷玺, 高瑞忠, 任春涛. 乌梁素海富营养化主控因子年季变化分析及综合评价. 水文, 2004, 24(3): 14-18.
- [ 12 ] 郝芳华, 欧阳威, 岳勇, 杨志峰, 李鹏. 内蒙古农业灌区水循环特征及对土壤水运移影响的分析. 环境科学学报, 2008, 28(5): 825-831.
- [ 13 ] 王旭升, 岳卫峰, 杨金忠. 内蒙古河套灌区 GSPAC 水分通量分析. 灌溉排水学报, 2004, 23(2): 3-6.
- [ 14 ] 杨建锋, 李宝庆, 李运生, 马瑞, 洪宝鑫. 浅地下水埋深区潜水对 SPAC 系统作用的初步研究. 水利学报, 1999, (7): 27-32.
- [ 17 ] 邱建军, 李虎, 王立刚. 中国农田施氮水平与土壤氮平衡的模拟研究. 农业工程学报, 2008, 24(8): 40-44.
- [ 18 ] 沈健林, 刘学军, 张福锁. 北京近郊农田大气  $\text{NH}_3$  与  $\text{NO}_2$  干沉降研究. 土壤学报, 2008, 45(1): 165-199.
- [ 19 ] 朱兆良. 中国土壤氮素研究. 土壤学报, 2008, 45(5): 775-783.
- [ 20 ] 康绍忠, 熊运章. 干旱缺水条件下麦田蒸散量的计算方法. 地理学报, 1990, 45(4): 476-484.
- [ 21 ] 杨培岭, 郝仲勇. 植物根系吸水模型的发展动态. 中国农业大学学报, 1999, 4(2): 67-73.
- [ 22 ] 朱兆良, 孙波, 杨林章, 张林秀. 我国农业面源污染的控制政策和措施. 科技导报, 2005, 23(4): 47-51.
- [ 23 ] 尹娟, 费良军, 田军仓, 王艳芳, 韩丙芳, 张学科, 勉韶平. 水稻田中氮肥损失研究进展. 农业工程学报, 2005, 21(6): 189-191.

**ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 16 August, 2011 (Semimonthly)**  
**CONTENTS**

A comparative study on the diversity of rhizospheric bacteria community structure in constructed wetland and natural wetland with reed domination .....	WANG Zhongqiong, WANG Weidong, ZHU Guibing, et al (4489)
Light response of photosynthesis and its simulation in leaves of <i>Prunus sibirica</i> L. under different soil water conditions .....	LANG Ying, ZHANG Guangcan, ZHANG Zhengkun, et al (4499)
Effects of colour shading on the yield and main biochemical components of summer-autumn tea and spring tea in a hilly tea field .....	QIN Zhimin, FU Xiaoqing, XIAO Runlin, et al (4509)
Effects of cadmium on the contents of phytohormones, photosynthetic performance and fluorescent characteristics in tobacco leaves .....	WU Kun, WU Zhonghong, TAI Fujun, et al (4517)
Comparative physiological responses of cadmium stress on <i>Enteromorpha clathrata</i> and <i>Enteromorpha linza</i> .....	JIANG Heping, ZHENG Qingsong, ZHU Ming, et al (4525)
Effects of salt stress on glucosinolate contents in <i>Arabidopsis thaliana</i> and <i>Thellungiella halophila</i> rosette leaves .....	PANG Qiuying, CHEN Sixue, YU Tao, et al (4534)
Effects of long-term double-rice and green manure rotation on rice yield and soil organic matter in paddy field .....	GAO Jusheng, CAO Weidong, LI Dongchu, et al (4542)
Nitrogen balance in the farmland system based on water balance in Hetao irrigation district, Inner Mongolia .....	DU Jun, YANG Peiling, LI Yunkai, et al (4549)
Seed characteristics and seedling growth of <i>Spartina alterniflora</i> on coastal wetland of North Jiangsu .....	XU Weiwei, WANG Guoxiang, LIU Jin'e, et al (4560)
Assessment of non-point source pollution export from Zigui county in the Three Gorges Reservoir area using the AnnAGNPS model .....	TIAN Yaowu, HUANG Zhilin, XIAO Wenfa (4568)
Effects of Cadmium pollution on oxidative stress and metallothionein content in <i>Pirata subpiraticus</i> (Araneae: Lycosidae) in different habitats .....	ZHANG Zhengtian, PANG Zhenling, XIA Min, et al (4579)
The distribution of size-fractionated chlorophyll a in the Indian Ocean South Equatorial Current .....	ZHOU Yadong, WANG Chunsheng, WANG Xiaogu, et al (4586)
Change of waterbird community structure after the intertidal mudflat reclamation in the Yangtze River Mouth: a case study of NanHui Dongtan area .....	ZHANG Bin, YUAN Xiao, PEI Enle, et al (4599)
Application of fish assemblage integrity index (FAII) in the environment quality assessment of surf zone of Yangtze River estuary .....	MAO Chengze, ZHONG Junsheng, JIANG Rijin, et al (4609)
Population age structure of Antarctic krill <i>Euphausia superba</i> off the northern Antarctic Peninsula based on fishery survey .....	ZHU Guoping, WU Qiang, FENG Chunlei, et al (4620)
Validation and adaptability evaluation of rice growth model ORYZA2000 in double cropping rice area of Hunan Province .....	MO Zhihong, FENG Liping, ZOU Haiping, et al (4628)
Coupled energy and carbon balance analysis under dryland tillage systems .....	WANG Xiaobin, WANG Yan, DAI Kuai, et al (4638)
The nitrate-nitrogen leaching amount in paddy winter-spring fallow period .....	WANG Yongsheng, YANG Shiqi (4653)
The sources of organic carbon and nitrogen in sediment of Taihu Lake .....	NI Zhaokui, LI Yuejin, WANG Shengrui, et al (4661)
Effect of partial solar eclipse on airborne culturable bacterial community in Urumqi .....	MA Jing, SUN Jian, ZHANG Tao, et al (4671)
Comparative study on density related intra- and inter-specific effects in <i>Laodelphax striatellus</i> (Fallen) and <i>Nilaparvata lugens</i> (Stål) .....	LÜ Jin, CAO Tingting, WANG Liping, et al (4680)
Behavior rhythm and seasonal variation of time budget of sun bear ( <i>Helarctos malayanus</i> ) in captivity .....	LAN Cunzi, LIU Zhensheng, WANG Aishan, et al (4689)
Disturbance regimes and gaps characteristics of the desert riparian forest at the middle reaches of Tarim River .....	HAN Lu, WANG Haizhen, CHEN Jiali, et al (4699)
Death causes and conservation strategies of the annual regenerated seedlings of rare plant, <i>Bretschneidera sinensis</i> .....	QIAO Qi, QIN Xincheng, XING Fuwu, et al (4709)
Effects of municipal compost extracted complex microbial communities on physio-ecological characteristics of turfgrass under drought stress .....	DUO Lian, WANG Jingjing, ZHAO Shulan (4717)
Spatiotemporal relationship of leaf area index simulated by CLM3.0-DGVM and climatic factors .....	SHAO Pu, ZENG Xiaodong (4725)
Analysis of circular economy of Liaoning Province based on eco-efficiency .....	HAN Ruiling, TONG Lianjun, SONG Yanan (4732)
<b>Review and Monograph</b>	
The fungal to bacterial ratio in soil food webs, and its measurement .....	CAO Zhiping, LI Depeng, HAN Xuemei (4741)
Indicators for evaluating sustainable communities: a review .....	ZHOU Chuanbin, DAI Xin, WANG Rusong, et al (4749)
<b>Discussion</b>	
Differential expression of <i>PAL</i> multigene family in allelopathic rice and its counterpart exposed to stressful conditions .....	FANG Changxun, WANG Qingshui, YU Yan, et al (4760)
<b>Scientific Note</b>	
Ecology study on the benthic animals of QinZhou Bay .....	WANG Di, CHEN Pimao, MA Yuan (4768)
Change characteristics of soil carbon and nitrogen contents in the Yellow River Delta soil after artificial restoration .....	DONG Kaikai, WANG Hui, YANG Liyuan, et al (4778)
Estimation and spatial pattern analysis of forest biomass in Fenglin Nature Reserve based on Geostatistics .....	LIU Xiaomei, BU Rencang, DENG Huawei, et al (4783)
Study on sap flow in forest of <i>Quercus liaotungensis</i> and <i>Populus davidiana</i> by using the TDP method .....	SUI Xuhong, ZHANG Jianjun, WEN Wanrong (4791)
N <sub>2</sub> O Emission and its driving factors from typical marsh and shrub swamp in Xiaoxing'an Mountains, Northeast China .....	SHI Lanying, MU Changcheng, TIAN Xinmin, et al (4799)

# 2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊\*

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

## 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 31 卷 第 16 期 (2011 年 8 月)

## ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 31 No. 16 2011

**编 辑** 《生态学报》编辑部  
地址:北京海淀区双清路 18 号  
邮政编码:100085  
电话:(010)62941099  
www.ecologica.cn  
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

**Edited** by Editorial board of  
ACTA ECOLOGICA SINICA  
Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China  
Tel:(010)62941099  
www.ecologica.cn  
Shengtaixuebao@rcees.ac.cn

**主 编** 冯宗炜  
**主 管** 中国科学技术协会  
**主 办** 中国生态学会  
中国科学院生态环境研究中心  
地址:北京海淀区双清路 18 号  
邮政编码:100085

**Editor-in-chief** FENG Zong-Wei  
**Supervised** by China Association for Science and Technology  
**Sponsored** by Ecological Society of China  
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS  
Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

**出 版** 科 学 出 版 社  
地址:北京东黄城根北街 16 号  
邮政编码:100717

**Published** by Science Press  
Add:16 Donghuangchenggen North Street,  
Beijing 100717, China

**印 刷** 北京北林印刷厂  
**发 行** 科 学 出 版 社  
地址:东黄城根北街 16 号  
邮政编码:100717  
电话:(010)64034563  
E-mail:journal@espg.net

**Printed** by Beijing Bei Lin Printing House,  
Beijing 100083, China  
**Distributed** by Science Press  
Add:16 Donghuangchenggen North  
Street, Beijing 100717, China  
Tel:(010)64034563  
E-mail:journal@espg.net

**订 购** 全国各地邮局  
**国外发行** 中国国际图书贸易总公司  
地址:北京 399 信箱  
邮政编码:100044

**Domestic** All Local Post Offices in China  
**Foreign** China International Book Trading  
Corporation  
Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China

**广告经营**  
**许 可 证** 京海工商广字第 8013 号



ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元