

doi:10.7668/hbxb.2014.S1.056

不同水肥组合对岗南水库周边冬小麦-夏玉米 体系中氮素平衡及淋失的影响

郝桂琴¹,王 凌²,张国印²,茹淑华²,耿 暖²,孙世友²

(1.河北省农林科学院,河北 石家庄 050021;2.河北省农林科学院 农业资源环境研究所,河北 石家庄 050051)

摘要:针对岗南水库水体中度富营养化的现状,在保证作物稳产的同时,最大限度减少农田养分流失是降低农田面源污染、缓解水体富营养化的必由之路。以氮平衡原理研究氮素的盈余或亏缺,开展了不同水肥组合对岗南水库周边冬小麦-夏玉米种植体系中氮素淋失的影响研究。结果表明:在岗南水库周边旱地小麦-玉米轮作体系下,施氮量、施肥类型和灌水共同影响了硝态氮向深层的淋失,且施氮效应大于灌水效应。除不施氮的对照处理以外,其他水肥组合的土壤氮素均有盈余,淋失到140 cm 以下的硝态氮量在35.23~212.53 kg/(hm²·a)。推荐环境友好水肥组合为缓控释肥的精确施用处理 N_控W₂,比农民习惯施肥量的处理 N₂W₂ 氮素淋失量减少141.19 kg/(hm²·a),减少了80%。通过合理施肥与灌溉能有效降低岗南水库周边旱地小麦-玉米农区氮素淋失,提高肥料利用率,减少硝酸盐对地下水的威胁,对于保护石家庄珍贵的水资源具有十分重要的意义。

关键词:岗南水库;冬小麦-夏玉米;氮素平衡;氮淋失

中图分类号:S143.1 文献标识码:A 文章编号:1000-7091(2014)增刊-0299-06

Effect of Different Water-Fertilizer Groups on Nitrogen Balance and Leaching in Wheat-Maize Cropping System Surrounding Gangnan Reservoir

HAO Gui-qin¹, WANG Ling², ZHANG Guo-yin², RU Shu-hua², GENG Nuan², SUN Shi-you²

(1. Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050021, China; 2. Institute of Agro-recourse and Environment, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: According to the serious eutrophication status of Gangnan reservoir, reducing the N leaching in maximum when meeting the need of crop growth is the only way for minimizing the non-point pollution in cropland. In this study, balance theory of nitrogen was used to research the effect of water-fertilizer coupling on surplus or loss of nitrogen. The results showed that fertilization and irrigation both effected NO₃-N leaching to deep soil layer, and fertilization was the prominent factor. N in 0-140 cm soil layer of water-fertilizer combination was surplus except CK. Leaching NO₃-N under 140 cm was between 35.23-212.53 kg/(ha·a) with different water and fertilizer. The most environmental friendly combination was N_控W₂, and it reduced the nitrogen leaching 141.19 kg/(ha·a) than N₂W₂, the rate was 80%. The reasonable fertilizer and irrigation can effectively decrease the nitrogen leaching, improve the fertilizer utilization efficiency, and reduce the menace from nitrate to groundwater in Wheat-maize cropping fields surrounding Gangnan reservoir.

Key words: Gangnan reservoir; Wheat-maize; Nitrogen balance; Nitrogen leaching

岗南水库位于河北省省会石家庄市平山县,革命圣地西柏坡正坐落于此,它是石家庄市的重要地表水源保护地,也是地下水的重要补给水源,除防

洪、灌溉外,还是发电等综合利用的大型枢纽工程,从2008年开始,岗南水库还要承担向北京应急供水的任务^[1]。随着该地区社会经济的发展和人口的

收稿日期:2014-10-18

基金项目:国家科技支撑计划课题项目(2012BAD15B02);国土资源部地质调查项目(200040007-3-11);河北省自然科学基金项目(C2013301068);石家庄科学技术研究与发展计划项目(12149392A)

作者简介:郝桂琴(1970-),女,河北藁城人,副研究员,硕士,主要从事农业环境方面的研究。

通讯作者:王 凌(1981-),女,河北石家庄人,副研究员,在读博士,主要从事农业环境方面的研究。

不断增长,水资源遭到过度开发和破坏,2009 年的河北省环境公报显示,在不计总氮、总磷两项富营养化指标的前提下,两水库水质达到Ⅱ类水质标准,两座水库所在的子牙河水系却为重度污染^[2]。据 2010 年李建锋^[3]的研究,农业污染源是石家庄周边地区大型水体的第一大污染源,农业面源污染对水库总氮、总磷污染负荷的贡献率最高。在全世界不同程度退化的 12 亿 hm² 耕地中约有 12% 由农业面源污染引起^[4-7],而农田的氮、磷流失是水体富营养化及农业面源污染的主要原因^[8-9]。因此,对农业面源污染高风险区的防控研究已成为各国研究的热点。

岗南水库所在的河北省是严重的资源型缺水省份,人均水资源占有量仅为全国平均值的 1/7,供需矛盾十分突出^[10-11]。在小麦-玉米轮作体系下,出现随着施氮量增加,冬小麦吸氮量增加而氮肥利用率递减的现象^[12],农民传统的施肥和灌溉习惯不仅抬高了生产成本,而且致使农田氮、磷流失,造成了严重的农业面源污染问题^[13-16]。本研究正是基于系统中氮素平衡原理,针对岗南水库的环境现状,在该种植区的种植结构和土体结构下,充分发挥水肥的协同作用,提高水肥利用效率,在保证作物增产、农民增收的同时,从源头减少农田土壤盈余氮素进入水体,以期为防控岗南水库地区农业面源污染提供科技支撑,对于保护石家庄珍贵的水资源具有十

分重要的意义。

1 材料和方法

1.1 岗南水库流域自然条件及试验设计

岗南水库控制流域面积 15 900 km²,总库容 15.17 亿 m³,防洪库容 9.17 亿 m³,防洪标准为 5 000 年一遇^[17]。整个岗南水库水源保护区的地貌属低山丘陵区,海拔高度在 200 ~ 700 m,年平均气温 0.5 ~ 13.5 ℃,年日照 2 775 h,无霜期约 190 d,土壤属褐土,地下水含量丰富,浅层地下水水质良好是当地农业和生活水源,水浇地占地 90% 以上,基本实现水利化^[3]。试验于 2012-2013 年在距岗南水库 1 km 的岗南镇米家沟村进行(试验地点见图 1)。

在调查的 0 ~ 20 cm 耕层土壤主要速效养分等理化性质及土壤质地分别见表 1,2。

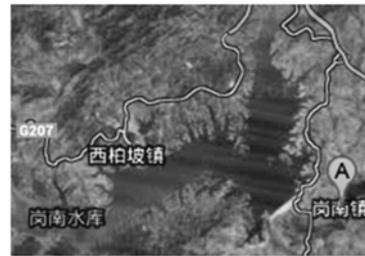


图 1 试验点位置

Fig. 1 The site of the study region

表 1 试验地土壤基本理化参数(0 ~ 20 cm 土层)

Tab. 1 The physical and chemical characteristics of soil in study region (0-20 cm layer)

项目 Item	硝态氮 /(mg/kg) Nitrate nitrogen	速效磷 /(mg/kg) Available P	速效钾 /(mg/kg) Available K	含水量/% Water content	容重 /(g/cm ³) Soil bulk density	pH 值 pH value
范围 Range	10.77 ~ 25.26	5.80 ~ 18.40	9.20 ~ 78.62	15.60 ~ 22.07	1.35 ~ 1.45	7.78 ~ 9.03
平均值 Average	16.99	10.86	42.06	18.11	1.39	8.64
标准差 Standard deviation	3.23	3.86	6.21	1.08	0.04	0.21
变异系数 Coefficient of variation	0.19	0.36	0.53	0.06	0.03	0.03

表 2 试验区土壤质地

Tab. 2 Soil texture in study region

地点 Site	土层/cm Soil layer							
	0 ~ 20	20 ~ 40	40 ~ 60	60 ~ 80	80 ~ 100	100 ~ 120	120 ~ 140	> 140
岗南 Gangnan	壤土	壤土	壤土	沙壤土	沙壤土	沙土	沙粒	石砾

试验处理:设 9 个处理,3 次重复,随机区组排列。小区面积 50 m²。分别为:习惯灌水 W₃ + N₀;习惯灌水 W₃ + 习惯施氮 N₂;习惯灌水 W₃ + 精确施氮 N₁;习惯灌水 W₃ + 精确施氮玉米缓控释肥 N_控;习惯灌水 W₃ + 精确施氮小麦/玉米专用肥 N_专;节水灌溉 W₂ + 习惯施氮 N₂;节水灌溉 W₂ + 精确施氮 N₁;节水灌溉 W₂ + 精确施氮玉米缓控释肥 N_控;节水灌溉 W₂ + 精确施氮小麦/玉米专用肥 N_专。

肥料类别:单质氮素:尿素(N 46%)、小麦专用肥(N 19%,为 N_专处理),玉米专用肥(N 20%,为 N_专处理)、玉米缓控肥(N 30%,为 N_控处理)。磷、钾肥为常规施用量,分别为:P₂O₅ 270 kg/hm²,K₂O 75 kg/hm²。

1.2 样品采集和分析

供试小麦品种:北京 0045;玉米品种:郑单 958。冬小麦产量,分小区单独收获,单打单收称重计

算产量。玉米产量,每个小区单独收获称重计算产量。

在小麦和玉米收获后分别采集的籽粒样品,利用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮-蒸馏定氮方法^[18]测定籽粒含氮量,并计算出每季作物吸氮量。

土壤剖面样品的采集,分6层取样:0~30,30~60,60~90,90~120,120~150,150~180 cm。采集的新鲜土壤样品带回实验室用于测定硝态氮含量,采用0.01 mol/L $CaCl_2$ 溶液浸提^[19],用UV160U型紫外可见分光光度计(岛津仪器有限责任公司)进行测定。数据结果采用Excel和SAS统计软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同水肥组合对岗南水库周边小麦-玉米体系中氮素平衡的影响

2.1.1 水肥组合处理以外的影响因素 氮素输入:

①基础土壤的硝态氮量,在布置试验前,对研究区中0~140 cm的基础土壤进行了分层采集,并分析了其土壤硝态氮总量背景值,为155.24 kg/hm²;②有机肥,据调查,在冬小麦-夏玉米轮作体系中有机的投入主要依靠残留在田间的作物秸秆。华北地区冬小麦农田有机肥氮平均投入为N 59 kg/(hm²·a)夏玉米仅为N 9 kg/(hm²·a),冬小麦-夏玉米轮作有机肥氮的施用量平均为N 68 kg/(hm²·a)^[20]。本研究沿用这一结果;③非生物固氮,旱地作物的非共生固氮,国内外的研究估测一般为15~30 kg/(hm²·a)^[21-25]。朱兆良和文启孝^[26]考虑到氮肥对非共生固氮的抑制作用,估计中国小麦的非共生固氮量为15 kg/(hm²·a)。基于目前对非共生固氮数量的研究较为缺乏,本研究沿用这一估算结果;④降水,大气氮素沉降是氮素生物地球化学循环中的重要环节之一。由于化学肥料使用,矿物质燃烧以及畜牧业发展,人类活动导致了大气活性氮浓度的持续升高^[27-29]。由于该指标在氮素输入总量中所占比例仅为3%左右^[17],因此,本项目未在当地做实际测定。据张颖等^[30]研究的华北平原农田生态系统中,由降水输入的大气氮素年均沉降量为28 kg/hm²。本研究沿用这一结果;⑤种子,除上述氮素的输入项以外,在冬小麦和夏玉米播种过程中,种子也输入少量的氮素养分。冬小麦、夏玉米播种时种子带入的氮量可以直接根据冬小麦、夏玉米播种量和籽粒含氮量计算。华北地区冬小麦-夏玉米轮作体系中,一般冬小麦播种量为225 kg/(hm²·a),夏玉米播种量为30 kg/(hm²·a),一般冬小麦和夏玉

米籽粒含氮量为N 21,16 g/kg,所以冬小麦和夏玉米种子带入的氮量分别为4.73,0.48 kg/(hm²·a),整个轮作周期播种带入的总氮量为N 5 kg/(hm²·a)^[30]。本研究沿用这一结果。

氮素输出:①氨挥发,目前北方旱作农业中,尤其是在华北地区,虽然氮肥的施用多采取深施、“以水带氮”或撒施后翻埋等减少氮肥氨挥发损失等农业措施,但在华北地区石灰性土壤上氮肥的氨挥发损失仍然较高。微气象法和风洞法的测定氨挥发结果表明,华北地区冬小麦-夏玉米轮作体系中氨挥发损失量与氮肥施用量之间呈显著的正相关关系($y=0.239X+1.330$,相关系数 $r=0.874$),李俊良等^[31]根据对微气象学观测结果的统计汇总,指出旱地常规管理下氮肥的氨挥发损失平均为施氮量的16%。本研究以该比例计算本试验通过氨挥发损失的氮量大约在0~122 kg/(hm²·a)(表3);②反硝化,从华北地区的气候条件来看,冬小麦-夏玉米轮作体系的夏玉米生育期温度、水分状况都很好,比较适于微生物活动,张玉铭、邹国元等^[32-33]认为,华北地区冬小麦-夏玉米轮作体系反硝化损失量平均占施氮量的3%。根据这一比例,本研究通过试验设计氮肥施用量,计算得出试验农田化肥反硝化损失氮总量在0~16.65 kg/(hm²·a)(表3)。

2.1.2 不同水肥组合对氮素平衡的影响因素 氮素输入:

①不同水肥组合的化肥施入量,不同处理的氮肥施用量标准,小麦季:不施N(N₀),适宜N量(225 kg/hm²)(N₁或N_专或N_控),农民传统用量(300 kg/hm²)(N₂);玉米季:不施N(N₀),适宜N量(190 kg/hm²)(N₁或N_专或N_控),农民传统用量(250 kg/hm²)(N₂)。②不同水肥组合由灌溉引入的氮素量:由采集的灌溉水样品测定结果得知,灌溉水中氮素浓度小麦季(玉米季不设水分处理)为3.39 mg/L(以NO₃-N计)。小麦季各处理均灌冻水外,由返青后不同的灌溉处理W₂灌溉两水(1800 m³/hm²)、W₃农民传统灌溉三水(2700 m³/hm²)计算分别可得:处理W₂为N 4.086 kg/hm²,处理W₃为N 6.129 kg/hm²。

氮素输出:①不同水肥组合的作物收获带走的氮素量,在2012-2013试验年度内,全部秸秆都还田,因此,作物秸秆带走的氮素不计算在内,仅计算作物籽粒带走的氮素,不同水肥处理的小麦和玉米产量(表4)。利用测定的每季作物吸氮量和产量,可计算出以作物吸收输出的氮量在258.55~335.87 kg/(hm²·a)(表3)。②不同水肥组合的土壤中残留的硝态氮量2013试验年度内,经分析采集玉米收获

期后的土壤样品得知,在 0 ~ 140 cm 土层中残留的 硝态氮总量在 78.02 ~ 252.08 kg/hm³ (表 3)。

表 3 不同水肥组合对岗南水库周边小麦-玉米轮作体系中氮素平衡的影响

Tab.3 Effect of different water-fertilizer groups on nitrogen balance in wheat-maize cropping system surrounding Gangnan reservoir

kg/(hm²·a)

项目 Item	N ₀ W ₃	N ₁ W ₂	N ₁ W ₃	N ₂ W ₂	N ₂ W ₃	N _控 W ₂	N _控 W ₃	N _专 W ₂	N _专 W ₃
氮输入 Nitrogen input	0 ~ 140 cm 基础土中硝态氮总量 The nitrogen gross of 0 - 140 cm base soil								
化肥 Fertilizer	155.24	155.24	155.24	155.24	155.24	155.24	155.24	155.24	155.24
农家肥 Manure	0	415	415	550	550	415	415	415	415
非生物固氮 Non-symbiotic nitrogen fixation	68	68	68	68	68	68	68	68	68
降水 Precipitation	15	15	15	15	15	15	15	15	15
灌溉 Irrigation	28	28	28	28	28	28	28	28	28
种子 Seed	6.13	4.09	6.13	4.09	6.13	4.09	6.13	4.09	6.13
输入小计 Total input	5	5	5	5	5	5	5	5	5
氮输出 Nitrogen output	0 ~ 140 cm 土壤硝态氮残留量 The nitrogen gross of residues in 0 - 140 cm soil								
作物收获 Crops harvest	277.37	690.33	692.37	825.33	827.37	690.33	692.37	690.33	692.37
氨挥发 Ammonia volatilization	106.63	146.36	152.13	218.78	189.70	252.08	183.96	113.57	78.02
反硝化 Denitrification	258.55	291.18	320.58	325.63	320.64	324.17	323.65	314.26	335.87
输出小计 Total output	0	66.4	66.4	88	88	66.4	66.4	66.4	66.4
淋失量 Leaching	0	12.45	12.45	16.5	16.5	12.45	12.45	12.45	12.45
	365.17	516.39	551.56	648.91	614.84	655.10	586.46	528.28	471.13
	-87.80	173.94	140.81	176.42	212.53	35.23	105.91	183.65	199.63

表 4 2013 年不同水肥组合的小麦和玉米产量

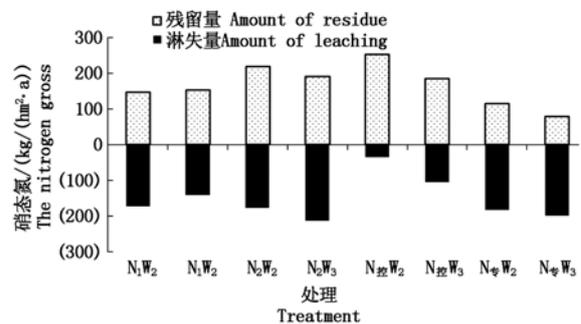
Tab.4 The yield of wheat and maize with different water and fertilizer groups in 2013

kg/hm²

作物 Crops	N ₀ W ₃	N ₁ W ₂	N ₁ W ₃	N ₂ W ₂	N ₂ W ₃	N _控 W ₂	N _控 W ₃	N _专 W ₂	N _专 W ₃
小麦 Wheat	3 390	4 592	5 593	5 707	5 585	5 675	5 826	5 261	6 021
玉米 Maize	7 923	8 190	8 507	8 617	8 517	8 584	8 419	8 549	8 760

2.1.3 不同水肥组合对岗南水库小麦-玉米轮作体系中氮素淋失的影响 结合表 3 和图 2 可以看出,在岗南水库旱地小麦-玉米轮作体系下,施氮量、施肥类型和灌水共同影响了硝态氮的淋失,且施氮效应大于灌水效应。除不施氮的对照处理亏缺外,各水肥组合均有盈余,淋失到石砾层 140 cm 以下硝态氮淋失量在 35.23 ~ 212.53 kg/(hm²·a),其中最大的是处理 N₂W₃。这是由于相同灌水条件下(同 W₂ 下或同 W₃ 下),不同施肥条件的硝态氮淋失量排序为 N₂ > N_专 > N₁ > N_控,且差异明显,说明不同的施肥量及施肥种类对硝态氮淋失的影响差异显著;相同施肥条件(同 N₂ 下或同 N_控 或同 N_专)下,处理 W₃ 的 0 ~ 140 cm 土层硝态氮残留量均大于 W₂,而相同施肥条件下由作物收获带走的氮素很接近,说明相同肥料施用处理下灌水对硝态氮向深层淋溶有一定影响。由于岗南试验区 0 ~ 140 cm 的土层较薄,仅为 100 cm 左右,该地区地下水位较浅(约为地下 2 ~ 3 m),且 140 cm 以下均为保水保肥能力很差的石砾,因而盈余并累积下来的硝态氮对地下水构成很大的潜在威胁。在作物产量不受明显影响(N₂W₂、

N_控W₂、N_专W₂ 产量差异不显著)的前提下,处理 N_控W₂ 节省省工(一次性施入)又对环境影响较小,因此,将其推荐为岗南水库冬小麦-夏玉米轮作种植体系下环境友好水肥组合。



调查得知,实际生产中为保证产量,没有农民不对种植区进行化肥施用,因此为突出重点,不施肥的对照处理 N₀ 仅作试验参比,暂不列入柱状图比较范围。

During the survey, there is no farmer in Gangnan planting wheat and corn without fertilizer for getting enough grain yield. Therefore the treatment N₀ was just control group in the experiment, and was not in histogram.

图 2 不同水肥组合对岗南水库周边小麦-玉米轮作体系中氮素淋失的影响

Fig.2 Effect of different water-fertilizer groups on nitrogen leaching in wheat-maize cropping system surrounding Gangnan

3 结论与讨论

3.1 结论

在岗南水库周边旱地小麦-玉米轮作体系下,施氮量和灌水共同影响了硝态氮向深层的淋失,且施氮效应大于灌水效应。除不施氮的对照处理以外,其他水肥组合的土壤氮素均有盈余,淋失到石砾层140 cm以下硝态氮淋失量中最大的是处理 N_2W_3 ,为 $212.53 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。本研究推荐岗南水库周边旱地小麦-玉米轮作体系的环境友好水肥组合为处理 $N_{\text{控}}W_2$,同一灌水量 W_2 下,缓控释肥的精确施用比农民习惯施肥量的处理 N_2W_2 氮素淋失量减少 $141.19 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,减少了80%,这是由于包裹在缓控包膜中的养分减缓了其释放速率所致。值得注意的是,岗南试验区0~140 cm的土层较薄,仅为100 cm左右,由于该地区地下水位较浅(约为地下2~3 m),且140 cm以下均为保水保肥能力很差的石砾,因而盈余并累积下来的硝态氮对地下水构成很大的潜在威胁。研究表明,通过科学的施肥量、施肥种类与灌溉管理能有效降低岗南水库旱地小麦-玉米农区氮素淋失,提高肥料利用率,减少硝酸盐对地下水的威胁,对于保护石家庄珍贵的水资源具有十分重要的意义。

3.2 讨论

高亚军等^[34]的水氮互作研究表明,施氮量是造成土壤中硝态氮累积的主要因素,灌水量对硝态氮累积量的影响较小。石维等^[35]的研究表明,施氮量对0~100 cm土体硝态氮累积量有显著影响,水氮交互作用对100~200 cm土层硝态氮累积量影响不显著。本研究结果显示,施氮量与施肥种类是影响收获期0~140 cm土层中 NO_3^- -N累积量的主导因素,施氮和灌水共同影响了硝态氮向深层的淋失,且施氮效应大于灌水效应,这与前两人研究结果既有相同之处,又有差异之分。分析其原因,当与各研究的土体结构和土壤肥力不同有关。

参考文献:

- [1] 韩晨霞,赵旭阳,李冬. 滹沱河岗黄段湿地水污染及生态修复探讨[J]. 中国水土保持,2008,(1):33-36.
- [2] 2009年河北省环境状况公报[R]. 石家庄:河北省环境保护局,2009:7-10.
- [3] 李建锋. 平山县岗南水库保护区绿色食品生产模式的环境效能影响评价研究[D]. 北京:中国农业科学院,2010.
- [4] Andraski, nitrate T W, Bundy L G, et al. Crop management and corn nitrogen rate effects on leaching[J]. Environment quality,2000,29:1095-1103.
- [5] Dennis L, Corwin. Non-point pollution modeling based on GIS[J]. Soil & Water Conservation,1998,(1):75-88.
- [6] Magette W L, Monitoring, Ritter W F, et al. Agricultural non-point source pollution[M]. London: LEWIS Publishers,2000:205-328.
- [7] Mostaghimi S, Brannan K M, Dillaha T A, et al. Best management practices for non-point source pollution control: selection and assessment. Agricultural Non-point Source Pollution[M]. London: LEWIS Publishers,2000:257-304.
- [8] 张维理,武淑霞,冀宏杰,等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21世纪初期中国农业面源污染的形势估[J]. 中国农业科学,2004,37(7):1008-1017.
- [9] 张维理,徐爱国,冀宏杰,等. 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[J]. 中国农业科学,2004,37(7):1026-1033.
- [10] 卢丽萍,程丛兰,刘伟东,等. 30年来我国农业气象灾害对农业生产的影响及其空间分布特征[J]. 生态环境学报,2009,18(4):1573-1578.
- [11] 黄志英,梁彦庆,葛京凤. 作物气候生产潜力估算及有效增产途径探讨[J]. 农业现代化研究,2003,24(6):446-451.
- [12] 同延安,赵营,赵护兵,等. 施氮量对冬小麦氮素吸收、转运及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2007,13(1):64-69.
- [13] 姜程. 不同经营体制下土壤养分空间变异规律及管理技术的研究[D]. 北京:中国农业科学院,2000:22-25.
- [14] 张凤翔. 水肥耦合对冬小麦产量与品质的调控效应研究[D]. 扬州大学,2006:3-4.
- [15] 孙世友,刘孟朝,王凌. 不同施氮措施对冬小麦氮肥利用率和土壤硝态氮积累的影响[J]. 华北农学报,2010,25(增刊):191-195.
- [16] 李建国,李贵宝,崔惠敏. 白洋淀芦苇湿地退化及其保护研究[J]. 南水北调与水利科技,2004,2(3):35-38.
- [17] 李国会,张有锁,王玉玲. 石家庄市地下水和地表水水源状况及对策解析[J]. 环境科学与管理,2007,32(10):26-32.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社,2005:81-83.
- [19] 全国农业技术推广服务中心. 土壤分析技术规范[M]. 2版. 北京:中国农业出版社,2006:47-50.
- [20] 赵荣芳,陈新平,张福锁. 华北地区冬小麦-夏玉米轮作体系的氮素循环与平衡[J]. 土壤学报,2009,46(4):684-686.
- [21] Moore A W. Non-symbiotic nitrogen fixation in soil and soil-plant systems[J]. Soils and Fertilizers,1966,29:113-128.

- [22] 刘中柱,邓伟文.红萍固氮及其利用[C]//中国土壤学会土壤农业化学专业委员会,中国土壤学会土壤生物和生物化学专业委员会.我国土壤氮素研究工作的现状与展望.北京:科学出版社,1986:195-202.
- [23] 樊庆笙.共生固氮和土壤肥力[C]//中国土壤学会土壤农业化学专业委员会,中国土壤学会土壤生物和生物化学专业委员会.我国土壤氮素研究工作的现状与展望.北京:科学出版社,1986:212-216.
- [24] 奚振邦.农田生态系统中氮素循环的简析[C]//中国土壤学会土壤农业化学专业委员会,中国土壤学会土壤生物和生物化学专业委员会.我国土壤氮素研究工作的现状与展望.北京:科学出版社,1986:217-227.
- [25] 刘中柱,尤崇杓.生物固氮译丛(三)[M].北京:农业出版社,1998:87-99.
- [26] 朱兆良,文启孝.中国土壤氮素[M].南京:江苏科学技术出版社,1992.
- [27] Holland E A, Dentener F J, Braswell B H, *et al.* Contemporary and pre-industrial global reactive nitrogen budgets [J]. *Biogeochemistry*, 1999, 46: 7-43.
- [28] Galloway J N, Dentener J F, Capone G D, *et al.* Nitrogen cycles: past, present and future [J]. *Biogeochemistry*, 2004, 70: 153-226.
- [29] Crutzen P J, Andreae M O. Biomass burning in the tropics: impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles [J]. *Science*, 1990, 250: 1669-1678.
- [30] 张颖,何春娥,刘学军,等.华北地区大气氮素沉降的时空变异研究[J].*生态学报*, 2006, 26(6): 1633-1639.
- [31] 李俊良,张瑞清,赵荣芳,等.华北地区冬小麦-夏玉米轮作体系的农田养分平衡模式[J].*中国农业科技导报*, 2003, 5(增刊): 40-44.
- [32] 张玉铭,黄文旭,曾江海,等.玉米地土壤反硝化速率与 N_2O 排放通量的动态变化[J].*中国生态农业学报*, 2001, 9(4): 70-72.
- [33] 邹国元,张福锁,巨晓棠,等.冬小麦-夏玉米轮作条件下氮素反硝化损失研究[J].*中国农业科学*, 2004, 37(10): 1492-1496.
- [34] 高亚军,郑险峰,李世清.农田秸秆覆盖条件下冬小麦增产的水氮条件[J].*农业工程学报*, 2008, 24(1): 55-59.
- [35] 石维.小麦-玉米栽培条件下的硝酸盐淋失与氮素利用[D].杨凌:西北农林科技大学, 2005: 6-8.