



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

基于产量和环境友好的黄土高原半干旱区玉米氮肥投入阈值研究

唐文雪, 马忠明, 王景才

引用本文:

唐文雪, 马忠明, 王景才. 基于产量和环境友好的黄土高原半干旱区玉米氮肥投入阈值研究[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(4): 726–733.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0162>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

氮肥施用对四川紫色土矿质态氮淋失特征及春玉米产量的影响

刘明鹏, 徐开未, 肖华, 陈晓辉, 彭丹丹, 卢俊宇, 陈远学

农业资源与环境学报. 2022, 39(1): 88–98 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0655>

有机肥添加对不同磷肥用量新疆棉田磷素状况及棉花产量的影响

袁芳, 张凯, 马超, 张楠, 盛建东, 张文太

农业资源与环境学报. 2022, 39(1): 118–128 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0767>

粪肥增施对水稻产量和氮素利用效率的影响

刘泰, 王洪媛, 杨波, 魏静, 贺鹏程, 王玉龙, 刘宏斌

农业资源与环境学报. 2022, 39(3): 545–555 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0096>

有机物料还田和减施氮肥对麦-玉周年农田碳氮水足迹及经济效益的影响

李春喜, 刘晴, 邵云, 李斯斯, 李晓波, 翁正鹏

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 527–536 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0150>

不同氮肥与矿化度水平微咸水喷灌对冬小麦光合特征及产量的影响

王罕博, 张栓堂, 焦艳平, 陈文彬, 李洁

农业资源与环境学报. 2022, 39(1): 99–106 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0745>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

唐文雪, 马忠明, 王景才. 基于产量和环境友好的黄土高原半干旱区玉米氮肥投入阈值研究[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(4): 726–733.

TANG W X, MA Z M, WANG J C. Determination of the input threshold of nitrogen fertilizer based on environment-friendly agriculture and maize yield[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(4): 726–733.



开放科学 OSID

基于产量和环境友好的黄土高原半干旱区玉米氮肥投入阈值研究

唐文雪¹, 马忠明^{2*}, 王景才³

(1. 甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所, 兰州 730070; 2. 甘肃省农业科学院, 兰州 730070; 3. 甘肃省定西市农业科学研究所, 甘肃 定西 741100)

摘要:为确定黄土高原半干旱区玉米的合理氮肥投入阈值,采用田间试验和室内分析方法,在甘肃省定西市安定区连续3年定位研究了不同施氮量对玉米产量、土壤矿质氮累积量、土壤氮素表观平衡等的影响。结果表明,施用氮肥对玉米有显著的增产作用,施氮量为 243.72 kg·hm⁻²时,玉米产量最高,为 8 139.65 kg·hm⁻²。之后随施氮量的增加,玉米产量不增反降,产量与施氮量呈显著的二次抛物线关系;土壤矿质氮累积量与施氮量呈极显著指数相关关系,在 200 cm 土层内的累积量随施氮量及施氮年限的增加而增大,施氮量为 270 kg·hm⁻²时,矿质氮累积量为 563.01 kg·hm⁻²,显著高于施氮量为 180、225 kg·hm⁻²处理的矿质氮累积量(410.88、480.97 kg·hm⁻²);氮素表观平衡值与施氮量呈极显著线性正相关。氮素表观平衡值为 0 时,施氮量为 179.50 kg·hm⁻²。施氮量在 179.50~243.72 kg·hm⁻²时,玉米产量为 7 925.14~8 139.65 kg·hm⁻²,土壤矿质氮累积量为 409.83~513.08 kg·hm⁻²,氮素平衡值为 0~49.15 kg·hm⁻²。综合分析提出,施氮量为 179.50~243.72 kg·hm⁻²是黄土高原半干旱区既保证玉米高产稳产又保证土壤氮素盈余及矿质氮残留较少,可实现环境安全的氮肥投入阈值。

关键词:施氮量;产量;矿质氮累积量;土壤氮素平衡值;氮阈值

中图分类号:S513

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2022)04-0726-08

doi: 10.13254/j.jare.2021.0162

Determination of the input threshold of nitrogen fertilizer based on environment-friendly agriculture and maize yield

TANG Wenxue¹, MA Zhongming^{2*}, WANG Jingcai³

(1. Institute of Soil, Fertilizer and Water-saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China; 2. Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China; 3. Dingxi Academy of Agricultural Sciences, Dingxi 741100, China)

Abstract: The semi-arid region of Loess Plateau is vast and acts as one of the main areas of grain production in China. In this study, field experiments in the Anding District of Gansu Province in China were conducted to explore the effects of different nitrogen application rates on maize yield, soil mineral nitrogen accumulation, and soil nitrogen surplus rate, to determine the high-yield and environmentally friendly optimal nitrogen application rate (ONR) for maize fields. The results showed that the application of nitrogen fertilizer had a significant effect on the yield of maize. When the nitrogen application rate was 243.72 kg·hm⁻², the yield of maize was the highest, at 8 139.65 kg·hm⁻². Later, with the increase of nitrogen application rate, the corn yield decreased, and the relationship between maize yield and nitrogen

收稿日期:2021-03-19 录用日期:2021-07-23

作者简介:唐文雪(1967—),女,甘肃临夏人,本科,研究员,主要从事农业面源污染防治与节水农业研究。E-mail:gstwx@163.com

*通信作者:马忠明 E-mail:mazhming@163.com

基金项目:甘肃省农业科学院科技创新专项(2019GAAS12);国家重点研发计划项目(2018YFD0800806);公益性行业(农业)科研专项基金(201503125-02)

Project supported: Scientific and Technological Innovation Project in Gansu Academy of Agricultural Science(2019GAAS12); The National Key Research and Development Program of China(2018YFD0800806); The Special Scientific Research Fund of Agriculture Public Welfare Profession of China (201503125-02)

application rate showed a significant quadratic parabolic relationship; the cumulative amount of soil mineral nitrogen in the 200 cm soil layer increased with the increase of nitrogen application rate and the period of nitrogen application. The cumulative amount of soil mineral nitrogen had a significant exponential correlation with nitrogen application rate. When the nitrogen application rate was $270 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, the soil mineral nitrogen accumulated to $563.01 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, which was significantly higher than $410.88 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $480.97 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, achieved under the nitrogen application rate of $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; thus, the nitrogen surplus rate was positively linearly correlated with the nitrogen application rate. When the nitrogen surplus rate was 0, the nitrogen application rate was $179.50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. When the nitrogen application rate was $179.50 \sim 243.72 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, the maize yield was $7\,925.14 \sim 8\,139.65 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, soil mineral nitrogen accumulation was $409.83 \sim 513.08 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, and the nitrogen surplus rate was $0 \sim 49.15 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. Based on the comprehensive analysis, when the threshold of ONR is $179.50 \sim 243.72 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ in the semi-arid area of the Loess Plateau, a high and stable yield of maize was achieved, and the residual of soil mineral nitrogen was reduced.

Keywords: nitrogen application rate; yield; accumulation of soil mineral nitrogen; soil nitrogen balance; nitrogen threshold

氮是植物生长发育所必需的元素之一,氮肥对粮食增产具有十分重要的作用。中国耕地面积占世界耕地的比例不足 1/10,但人口占世界的比例高达 1/5,因而粮食高产至关重要。长期以来人类为了追求高产而大量使用化肥,但氮肥的过量投入及低利用率使我国氮素年损失量高达 990 万 t,相当于 2 160 万 t 尿素,不仅造成巨大的经济损失,还带来温室气体排放、生物多样性衰减、土地和淡水资源退化等^[1-2]环境问题。针对这一世界性问题,一些人少地多的发达国家采用降低产量目标以减少氮肥施用量的对策,但我国必须从协调作物高产与环境保护的关系出发,研究既能获得高产又能减轻氮肥投入对环境压力的理论及技术^[3]。而确定适宜施氮量是平衡氮肥施用产量效应和环境效应的有效手段,但合理确定施氮量并没有统一的标准和方法。

各国科研工作者在这方面已开展了大量工作。WANG 等^[4]通过文献综述和试验研究提出,华北平原小麦 98% 最大产量相对应的氮肥施用量可作为适宜的区域性氮肥施用阈值。罗付香等^[5]研究氮肥用量对紫色丘陵区坡耕地雨季土壤氮素流失及玉米产量的影响,提出了兼顾产量与环境因素的氮素投入阈值为 $186.73 \sim 393.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。连彩云等^[6]研究施氮量对春玉米的产量、矿质氮累积及氮素平衡的影响,提出我国北方平原区春玉米化学氮肥投入阈值为 $270 \sim 337 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。张君等^[7]研究认为土壤氮素盈余率与玉米产量、土壤氮残留和氮素回收率有关,并提出了内蒙古河套灌区施氮量 $193 \sim 291 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 是保证玉米产量和环境友好的合理施氮阈值。崔玉亭等^[8]根据环境经济学和农业技术经济学的原理,提出太湖流域稻田氮肥适宜施用量为 $221 \sim 261 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。就全国来说,一般粮食作物氮素用量在 $150 \sim 180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 较适宜^[9]。以上研究为合理施用氮肥控制面源污染提供

了重要的参考依据。

用什么指标来衡量不同尺度或生产体系氮素管理的优劣,是提高氮素管理水平的核心问题^[10]。作为政府和农民最关心的指标,产量对满足人类生活需求非常重要,因而是确定适宜施氮量的最常用指标^[11]。研究表明,基于高产的施氮量可作为氮素投入阈值^[14-7]。氮素平衡是衡量氮素投入生产力、环境影响和土壤肥力变化的最有效指标^[12]。减少土壤氮素盈余是目前最常用的确定适宜施氮量的方法。由于我国北方旱作农田土壤普遍具有较强的矿化和硝化能力,盈余的氮素在作物收获后主要以硝态氮形式累积于土壤剖面,而作物收获后根层硝态氮残留又被作为潜在淋洗的衡量指标^[13],用来评估氮素管理的合理程度。以上指标都有其自身的理论依据,是确定最佳施氮量的常用且有效的指标^[11]。

黄土高原半干旱区作为一个特定生态类型区,在我国旱作农业生产中占有重要地位。该区自然降水少且与农作物需水供需错位,粮食产量低而不稳^[14-15]。近年来,全膜双垄沟播旱作技术的广泛应用,使玉米种植面积迅速扩大。但农民盲目施肥、过量施肥现象普遍^[16]。目前,该区域合理施氮研究主要集中在氮肥施用的农学效应方面^[16-17],有关环境效应及兼顾产量的环境效应的研究鲜见报道。本研究通过 3 年定位试验,系统研究不同施氮水平对玉米产量、土壤矿质氮累积以及土壤氮素平衡的影响,以产量、氮素平衡值、矿质氮残留为约束指标,确定适宜施氮阈值,以期对黄土高原半干旱区玉米合理施肥提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2011—2013 年在定西市农业科学研究院综合试验站进行。试验区属黄土高原干旱半干旱区,

为典型雨养农业区,作物一年一熟。年均气温6.4℃,年平均降水390.9 mm,年蒸发量1 531 mm。降水量462.5、390.8、341.3、283.1 mm的保证率分别为20%、50%、75%、95%。2011年试验区玉米生长季降雨量仅为146.0 mm,并且降雨主要集中在7—9月。2012年和2013年生育期降雨量389.4 mm和430.7 mm,降雨与作物需求基本同步。试验期间各年降水量分布如图1所示。试验土壤为黄绵土,基本理化性质见表1。

1.2 试验设计

试验采用随机区组排列,设6个处理:①不施氮,②优化施氮量75%,③优化施氮量100%,④优化施氮量125%,⑤优化施氮量150%,⑥优化施氮量200%,分别记为N0、N1、N2、N3、N4、N5。氮肥优化量(以纯N计)为180 kg·hm⁻²,磷肥(P₂O₅)用量为120 kg·hm⁻²。各处理磷肥全量及氮肥的2/3作基肥,剩余1/3氮肥在拔节期追施。3次重复,小区面积33 m²。

玉米采用全膜双垄沟播模式,沟内种植。带幅1.1 m,大垄70 cm,小垄40 cm,株距35 cm,播种密度53 500株·hm⁻²。2011—2013年5月上旬播种,10月上旬收获。

指示玉米品种为中玉9号。供试肥料为尿素和过磷酸钙。

1.3 测定项目与方法

试验开始前和每年秋季玉米收获后,以对角线法确定测点位置。每小区在垄沟及大小垄上各测定2

个点。用土钻采集0~200 cm土壤样品,每20 cm为一层,共10层。相同土层6个点土样混合后迅速放入-4℃冰柜中保存,用于测定土壤含水量、铵态氮及硝态氮含量。土壤水分用烘干法测定,土壤铵态氮、硝态氮用1 mol·L⁻¹ NaCl浸提,采用靛酚蓝比色法及紫外分光光度计法测定。

收获时各小区单独收获测产并随机取样3株,测定秸秆、籽粒干物质质量,然后粉碎并过2 mm筛备用。植株样品全氮采用H₂SO₄-H₂O₂消煮后凯氏定氮法测定。

1.4 数据处理与分析方法

试验数据采用Excel 2003和SPSS 16.0软件进行统计分析,不同处理的比较按照随机区组试验设计法进行。各指标采用的计算方法^[18-19]如下:

土壤硝态氮累积量(kg·hm⁻²)=土壤容重(g·cm⁻³)×土层厚度(cm)×土壤硝态氮含量(mg·kg⁻¹)/10

土壤铵态氮累积量(kg·hm⁻²)=土壤容重(g·cm⁻³)×土层厚度(cm)×土壤铵态氮含量(mg·kg⁻¹)/10

土壤矿质氮累积量(kg·hm⁻²)=土壤硝态氮累积量(kg·hm⁻²)+土壤铵态氮累积量(kg·hm⁻²)

N素表观平衡值(kg·hm⁻²)=施N量(kg·hm⁻²)-植株N素吸收量(kg·hm⁻²)

2 结果与分析

2.1 施氮量对玉米产量的影响

施氮量对玉米产量的影响结果(图2)表明,2011、2013年N2处理产量显著高于对照N0及低氮处理N1和高氮处理N5,N2、N3、N4处理间差异不显著。2012年施氮处理产量显著高于N0处理,但相互间差异不显著。N2处理平均产量最高,显著高于N0、N1及N5处理,与N3、N4处理间差异不显著。并且2011、2012年和2013年施用氮肥较不施氮肥分别增产25.19%~66.54%、37.60%~42.69%、85.95%~92.44%,平均增产51.22%~62.52%,增产效果显著。

2.2 施氮量对土壤矿质氮含量的影响

矿质氮在土壤剖面中的含量及其空间分布特征是表征矿质氮淋失风险的重要指标。图3显示了不同年份及施氮水平下0~200 cm土壤矿质氮剖面变化

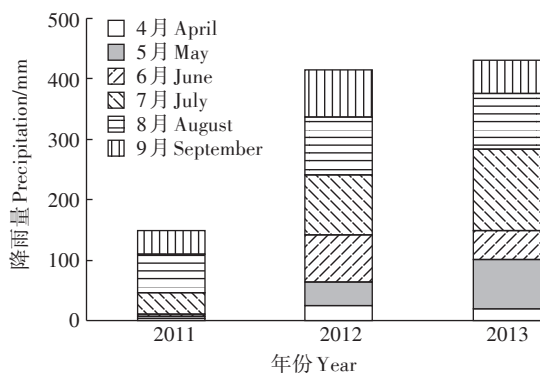


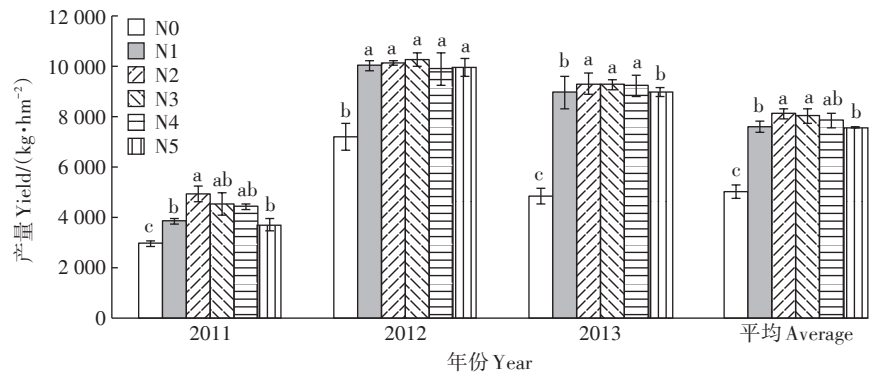
图1 2011—2013年玉米生长季降水量

Figure 1 The precipitation during maize growing period in 2011—2013

表1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 Physiochemical characteristics of the tested soil

土层 Soil depth/cm	有机质 Organic matter/(g·kg ⁻¹)	硝态氮 NO ₃ -N/(mg·kg ⁻¹)	铵态氮 NH ₄ -N/(mg·kg ⁻¹)	有效磷 Olsen-P/(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K/(mg·kg ⁻¹)	pH	容重 Bulk density/(g·cm ⁻³)
0~20	40.56	23.13	0.831	28.24	186.35	8.4	1.20
20~40	10.39	17.19	0.998	8.82	—	8.5	1.54



不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)

Different small letters indicate significant differences among treatments at the 0.05 level

图2 施氮量对玉米产量的影响

Figure 2 Effects of N application rate on maize yield

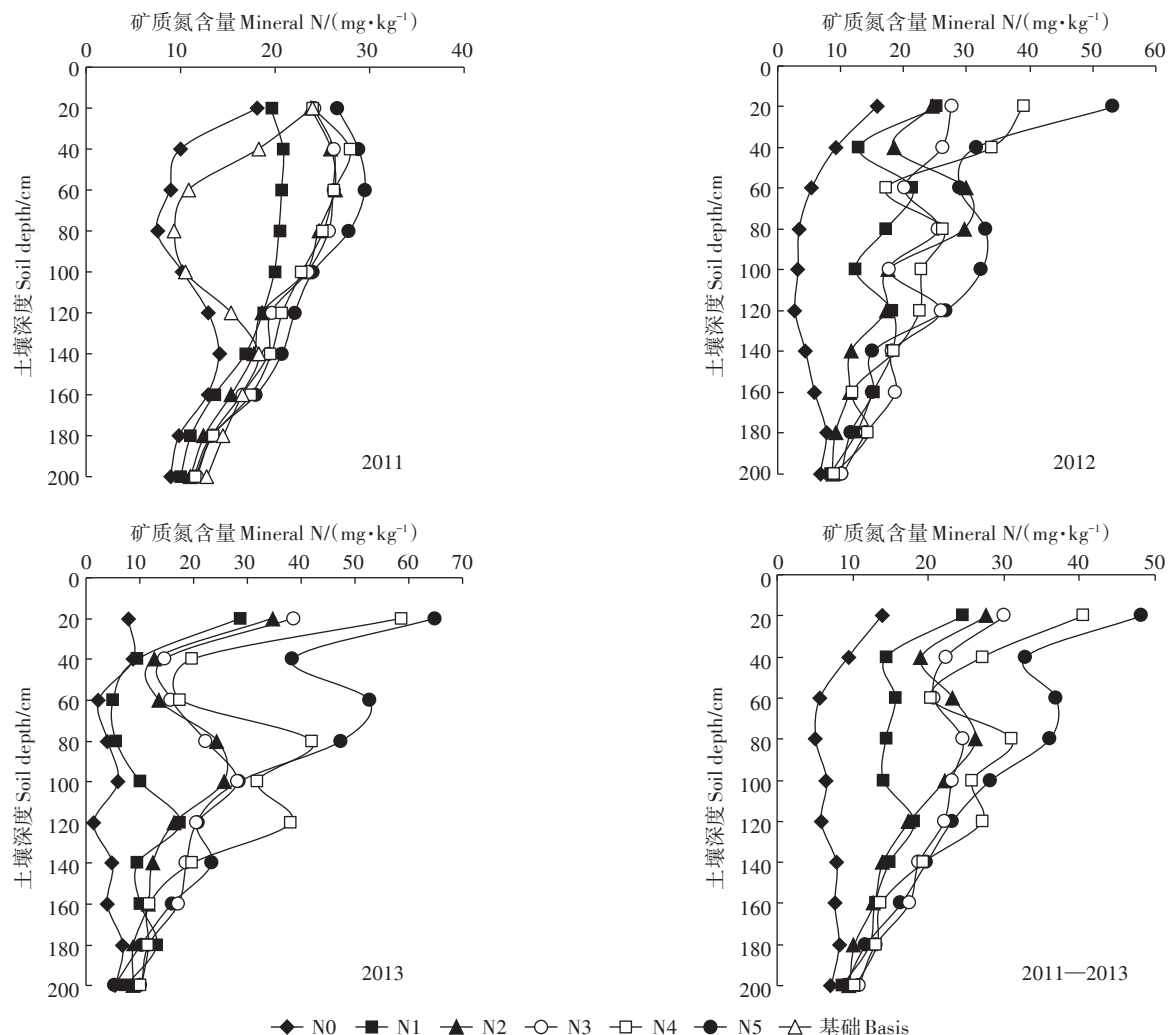


图3 不同施氮量下土壤剖面矿质氮含量变化特征

Figure 3 Effects of different N application rates on mineral N content

特征。2011—2013年0~20 cm土层矿质氮含量最高,随着土层深度增加,矿质氮呈下降趋势。在0~100 cm各处理含量差异较大,在100~180 cm各处理差异

逐渐减小,在180 cm以下趋于一致。随施氮量的增加,200 cm土壤矿质氮含量呈增加趋势,表现为 $N5>N4>N3>N2>N1>N0$,并且矿质氮含量差异显著;随着

种植年限的增加,在不同土层处理间矿质氮含量差异增大。N0处理矿质氮含量显著低于基础水平,N1处理与基础水平一致,N2、N3处理比基础水平高,但没有造成矿质氮的富集现象,而N4、N5处理土壤中矿质氮富集现象明显,属于氮肥过量。氮肥的过量施用造成土壤内矿质氮大量累积,大量矿质氮在强降雨和过量灌水条件下向下淋溶,从而污染地下水。

2.3 施氮量对土壤氮表观平衡值的影响

土壤氮表观平衡结果(表2)表明,随着氮肥用量的增加,氮表观平衡值从负值经零到正值不断变化。3年平均结果表明,施氮量少于180 kg·hm⁻²的条件下,氮表观平衡值小于-27.63 kg·hm⁻²,表示土壤中的氮处于亏缺状态,随着种植年限延长,土壤氮库被不断消耗,最终影响土壤肥力。施氮量在180~225 kg·hm⁻²条件下,氮表观平衡值为-27.63~14.72 kg·hm⁻²,土壤氮收支基本平衡。该施氮水平既可获得较高目标产量,也不会消耗土壤氮,不会引起氮素的大量损失。而在施氮量超过270 kg·hm⁻²时,氮素盈余超过65.13 kg·hm⁻²,导致氮素大量盈余,而土壤持续较高的氮盈余最终提高了土壤氮素的累积量,矿质氮累积量比试验前土壤增加202.54 kg·hm⁻²以上,使环境风险增加。

2.4 施氮量对玉米产量及环境指标的影响

考虑到氮肥的后效作用及年际的影响,3年平均投入和平均产出更能反映氮肥的施肥效应。本试验结果为玉米产量与施氮量呈极显著的二次曲线相关(图4),效应方程为 $y=-0.052x^2+25.347x+5\ 050.8$ ($R^2=0.980\ 8$)。施氮量为243.72 kg·hm⁻²时,玉米产量最高(8 139.65 kg·hm⁻²),最高产量的97%(7 895.46 kg·hm⁻²)与最高产量差异不显著,对应的施氮量为175.16 kg·hm⁻²。最高产量的95%(7 732.67 kg·hm⁻²)显著低于最高产量。因此,97%最高产量至最高产量(7 895.46~8 139.65 kg·hm⁻²)对应的施氮量175.16~

243.72 kg·hm⁻²是玉米获得高产的施氮阈值。200 cm土层矿质氮累积量与施氮量呈极显著指数相关,效应方程为 $y=218.71e^{0.003\ 5x}$ ($R^2=0.916\ 6$)。施氮量为180、225 kg·hm⁻²时,矿质氮累积量为410.88、480.97 kg·hm⁻²,两者差异不显著,施氮量为270 kg·hm⁻²时矿质氮累积量为563.01 kg·hm⁻²,显著高于N2、N3处理。因此氮素投入量的环境安全上限应低于270 kg·hm⁻²。氮素表观平衡值与施氮量呈显著线性正相关,效应方程为 $y=0.765\ 4x-137.39$ ($R^2=0.921\ 6$),氮素平衡值为0,表示土壤氮收支平衡,该点对应施氮量为179.50 kg·hm⁻²。该施氮条件下,玉米产量较高,与最高产量差异不显著,并且矿质氮累积量显著低于270 kg·hm⁻²处理,与180、225 kg·hm⁻²处理差异不显著。对以上效应方程联立并采用内插法计算分析,确定玉米高产及土壤氮素低盈余的施氮量为179.50~243.72 kg·hm⁻²。

3 讨论

研究表明,当施氮量较低时,作物产量随施氮量的增加而增加,但施氮量达到一定水平时,产量增加不明显甚至减产^[20-24]。这可能是由于过量施氮使作物冠层内透光率较低,降低了后期的光合性能,影响了作物产量^[25]。根据朱兆良等^[26]田间试验的统计,施氮量为150~180 kg·hm⁻²时,大田作物可达到较高的产量,因此将该施氮量定为控制大面积氮肥用量的“平均适宜施氮量”。本研究结果表明,由于2011年极端干旱,玉米产量显著低于2012年和2013年,但施氮处理间仍呈相似的规律。统计分析结果表明,N2、N3、N4处理产量最高,再增施氮导致产量下降。分析玉米产量与施氮量的效应方程,在施氮量为243.72 kg·hm⁻²时,玉米产量达到最高,97%最高产量的施氮量为175.16 kg·hm⁻²,因此,玉米高产的施氮阈值为175.16~243.72 kg·hm⁻²。

表2 施氮量对土壤氮表观平衡值的影响(kg·hm⁻²)
Table 2 Effects of N application rate on soil N surplus rate(kg·hm⁻²)

处理 Treatment	2011	2012	2013	平均 Average
N0	-125.94±11.40e	-112.82±19.65d	-76.21±7.49f	-105.16±7.88f
N1	-3.52±1.28d	-96.06±8.77d	-49.77±4.54e	-49.78±3.70e
N2	8.84±3.75d	-63.49±15.13c	-28.24±5.50d	-27.63±3.95d
N3	49.21±16.22c	-24.88±5.97b	19.83±3.13c	14.72±5.40c
N4	111.55±21.22b	23.78±3.29b	60.07±5.79b	65.13±8.87b
N5	226.57±20.78a	131.62±9.06a	162.87±17.76a	173.68±5.10a

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Notes: The different lowercase letters in a column indicate significant differences among treatments ($P<0.05$).

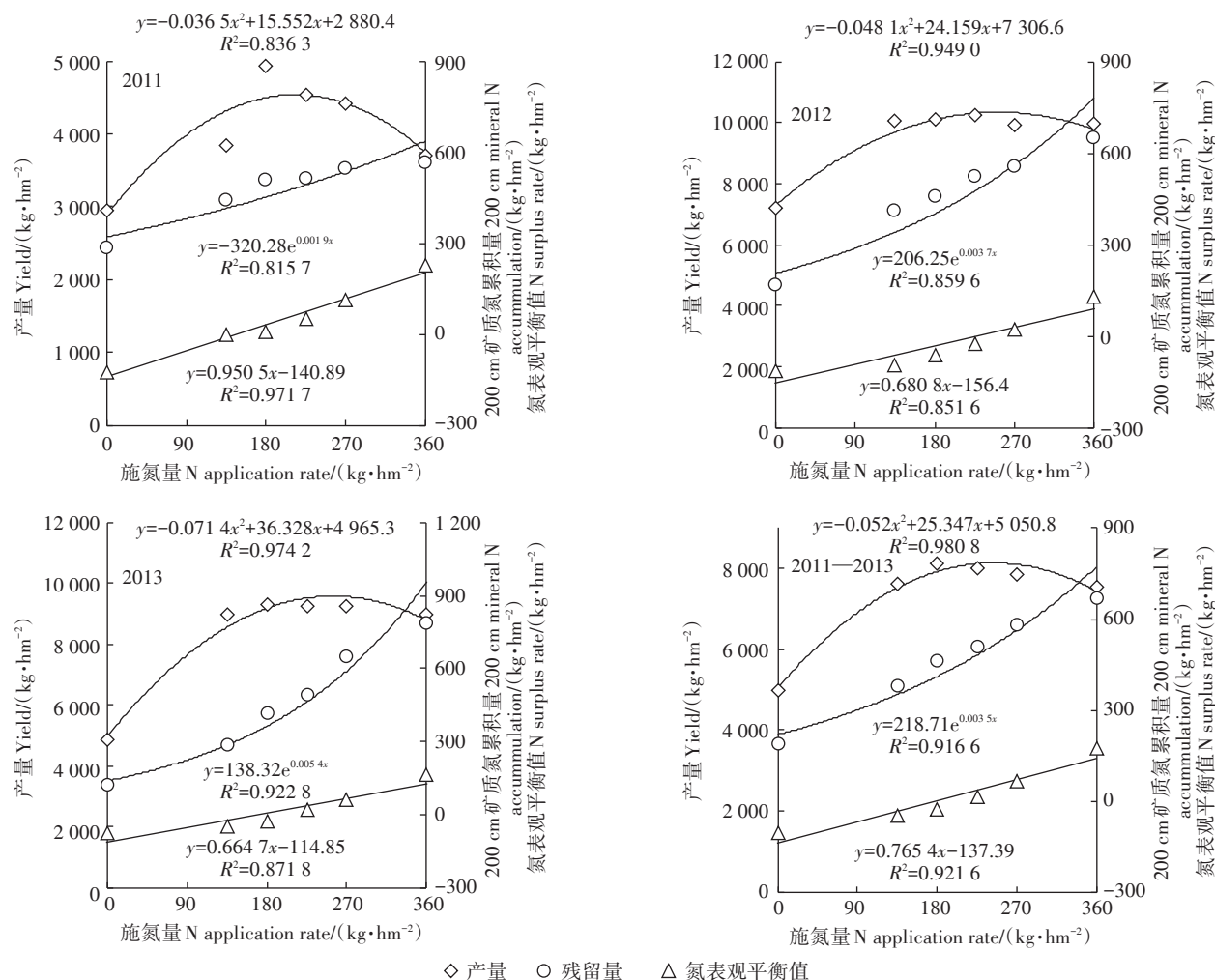


图4 2011—2013年施氮量与产量、矿质氮累积量、氮表观平衡值关系

Figure 4 The relationship between nitrogen application rate and yield, mineral nitrogen accumulation and nitrogen surplus rate from 2011 to 2013

氮肥可以增加土壤矿质氮的累积量,尽管土壤矿质氮(NH_4^+ 和 NO_3^-)占土壤中全氮含量的比例不高(1%~10%),却最易被植物吸收,具有重要的农学意义^[26]。大量研究表明,施氮量越大,土壤硝态氮在180 cm土层范围内的累积量越高^[27-28]。华北地区夏玉米经过2年种植后,在施氮量 $240\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $360\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,土壤硝态氮淋洗加剧^[29]。冬小麦-夏玉米轮作体系下,当施氮量低于 $203\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,残留硝态氮淋洗量并不大,不会对环境构成威胁^[30]。20世纪末,欧洲一些发达国家将防止氮肥造成水体污染的年施氮量安全上限定为 $225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,作物收获后100 cm土层的氮素残留量不超过 $50\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[31]。本研究表明,施氮量越大,土壤矿质氮在200 cm土层范围内的累积量也越高,施氮量为180、 $225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,矿质氮残留量为410.88、 $480.97\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,二者差异不显著,施氮量达到

$270\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,矿质氮累积量($563.01\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)急剧上升,显著高于施氮量 $225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时。依据环境效应,在生产中应将施氮量控制在 $270\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以内。

氮素表观平衡值是反映施氮量与植株吸氮量关系的重要指标。氮素盈余和氮损失之间存在极其显著的正相关关系^[32]。在荷兰,国家尺度上氮素盈余量减少 $1\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,淋失到地下水和地表水中的硝酸盐含量平均可以减少 $0.08\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $0.12\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[33]。本研究条件下,氮肥用量与土壤氮素盈余呈线性正相关关系($R^2=0.9216$),施氮量每减少 $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,氮素盈余可降低 $76.54\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,当施氮量为 $179.50\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,氮素盈余为0,氮收支可达到平衡。

土壤氮肥投入阈值的确定要研究供氮量、植株吸氮量和土壤氮库三者间的平衡关系。本研究结果表明,在施氮量 $179.50\sim 243.72\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,玉米产量

为 $7\,925.14 \sim 8\,139.65 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 200 cm 土壤矿质氮累积量较试验前土壤增加 $29.19 \sim 132.88 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 氮表观平衡值为 $0 \sim 49.15 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。施氮量低于 $179.50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 氮素盈余为负值, 长期持续会造成土壤肥力下降。施氮量超过 $243.72 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 产量不升反降, 并且 200 cm 土壤矿质氮累积量大幅提升, 对地下水环境造成威胁。为此, 依据 3 年平均产量、矿质氮累积量及土壤氮素盈余, 确定适宜施氮量为 $179.50 \sim 243.72 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 此为既保证玉米产量又实现土壤氮素盈余量较小的氮肥投入阈值。该阈值与 2007 年和 2010 年国家生态县和生态乡镇化肥施用强度标准 ($<250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)^[34-35] 一致。

4 结论

对于黄土高原半干旱区降雨量为 $283.1 \sim 462.5 \text{ mm}$ 的区域, 基于产量及环境安全的玉米氮肥投入阈值为 $179.50 \sim 243.72 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。该施氮量下, 玉米产量达到最高, 土壤氮素收支平衡, 并且未造成土壤矿质氮富集。

参考文献:

- [1] VITOUSEK P M, ABER J D, HOWARTH R W, et al. Human alteration of the global nitrogen cycle: Sources and consequences[J]. *Ecology Application*, 1997, 7(3): 737-750.
- [2] CHEN X P, CUI Z L, FAN M S, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J]. *Nature*, 2014, 514(7523): 486-489.
- [3] 巨晓棠, 张福锁. 中国北方土壤硝态氮的累积及其对环境的影响[J]. *生态环境*, 2003, 12(1): 24-28. JU X T, ZHANG F S. Nitrate accumulation and its implication to environment in north China[J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12(1): 24-28.
- [4] WANG H Y, ZHANG Y T, AN Q. Optimal thresholds of regional nitrogen fertilizer application for wheat in the North China Plain considering yield and environmental effects[J]. *Field Crops Research Volume*, 2017(6): 52-61.
- [5] 罗付香, 林超文, 涂仕华, 等. 紫色坡耕地玉米适产和环境友好的氮肥投入阈值[J]. *西南农业学报*, 2015, 28(2): 625-631. LUO F X, LIN C W, TU S H, et al. Threshold of nitrogen inputs of yield and suitable environment of purple sloping corn[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2015, 28(2): 625-631.
- [6] 连彩云, 马忠明. 北方平原春玉米化学氮肥投入阈值[J]. *西北农业学报*, 2016, 25(1): 9-15. LIAN C Y, MA Z M. Study on N threshold of spring maize in area of northern plain[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2016, 25(1): 9-15.
- [7] 张君, 赵沛义, 潘志华, 等. 基于产量及环境友好的玉米氮肥投入阈值确定[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(12): 136-143. ZHANG J, ZHAO P Y, PAN Z H, et al. Determination of input threshold of nitrogen fertilizer based on environment-friendly agriculture and maize yield[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(12): 136-143.
- [8] 崔玉亭, 程序, 韩纯儒, 等. 苏南太湖流域水稻经济生态适宜施氮量研究[J]. *生态学报*, 2000, 20(4): 659-662. CUI Y T, CHENG X, HAN C R, et al. The economic and ecological satisfactory amount of nitrogen fertilizer using on rice in Tai Lake watershed[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(4): 659-662.
- [9] 朱兆良, NORSE D, 孙波. 中国农业面源污染控制对策[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006: 119-201. ZHU Z L, NORSE D, SUN B. Control strategy of agricultural non-point source pollution in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2006: 119-201.
- [10] 巨晓棠, 谷保静. 氮素管理的指标[J]. *土壤学报*, 2017, 54(2): 281-296. JU X T, GU B J. Indexes of nitrogen management[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(2): 281-296.
- [11] 张亦涛. 基于农学效应和环境效益的华北平原主要粮食作物合理施氮量确定方法研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018: 51-54. ZHANG Y T. Study on determination method of reasonable nitrogen application of major grain crops in North China Plain based on agronomic effect and environmental benefit[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018: 51-54.
- [12] OENEMA O, KROS H, DE VRIES W. Approaches and uncertainties in nutrient budgets: Implications for nutrient management and environmental policies[J]. *European Journal of Agronomy*, 2003, 20(1/2): 3-16.
- [13] ZHOU J, GU B, SCHLESINGER W H, et al. Significant accumulation of nitrate in Chinese semi-humid croplands[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 25088.
- [14] 肖国举, 王静. 黄土高原集水农业研究进展[J]. *生态学报*, 2003, 23(5): 1003-1008. XIAO G J, WANG J. Research on progress of rain-water harvesting agriculture on the Loess Plateau of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5): 1003-1008.
- [15] 李凤民, 徐进章. 黄土高原半干旱地区集水型生态农业分析[J]. *中国生态农业学报*, 2002, 10(1): 101-103. LI F M, XU J Z. Rain water collecting eco-agriculture in semi-arid region of Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2002, 10(1): 101-103.
- [16] 唐文雪, 马忠明, 王景才. 施氮量对旱地全膜双垄沟播玉米田土壤硝态氮、产量和氮肥利用率的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(6): 58-63. TANG W X, MA Z M, WANG J C. Effects of nitrogen rate on soil nitrate-N, yield and nitrogen use efficiency of double-ridge furrow sowing with full plastic film mulching for maize in dry land[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(6): 58-63.
- [17] 李婷, 李世清, 占爱, 等. 地膜覆盖、氮肥与密度及其互作对黄土旱塬春玉米氮素吸收、转运及生产效率的影响[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(8): 1504-1517. LI T, LI S Q, ZHAN A, et al. Effects of film mulching, nitrogen fertilizer, plant density and its interaction on nitrogen accumulation, translocation and production efficiency of spring maize on dryland of Loess Plateau[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(8): 1504-1517.
- [18] 栗丽, 洪坚平, 王宏庭, 等. 施氮与灌水对夏玉米土壤硝态氮积累、氮素平衡及其利用率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(6): 1358-1365. LI L, HONG J P, WANG H T, et al. Effects of ni-

- trogen application and irrigation on soil nitrate accumulation, nitrogen balance and use efficiency in summer maize[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(6):1358-1365.
- [19] 刘瑞,戴相林,郑险峰,等.半旱地不同栽培模式及施氮下农田土壤养分表观平衡状况研究[J].植物营养与肥料学报,2011,17(4):934-941. LIU R, DAI X L, ZHENG X F, et al. Net nutrient balance in soil under different cultivation pattern and nitrogen application rate in semiarid region[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(4):934-941.
- [20] 吴永成,王志敏,周顺利.¹⁵N标记和土柱模拟的夏玉米氮肥利用特性研究[J].中国农业科学,2011,44(12):2446-2453. WU Y C, WANG Z M, ZHOU S L. Studies on the characteristics of nitrogen fertilizer utilization in summer maize based on techniques of soil column and ¹⁵N-label[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(12):2446-2453.
- [21] 巨晓棠,刘学军,邹国元,等.冬小麦/夏玉米轮作体系中的氮素损失途径分析[J].中国农业科学,2002,35(12):1493-1499. JU X T, LIU X J, ZOU G Y, et al. Evaluation of nitrogen loss way in winter wheat and summer maize rotation system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(12):1493-1499.
- [22] 宋海星,李生秀.玉米生长量、养分吸收量及氮肥利用率的动态变化[J].中国农业科学,2003,36(1):71-76. SONG H X, LI S X. Dynamics of nutrient accumulation in maize plants under different water and N supply conditions[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(1):71-76.
- [23] 吴文强,贺建德,赵永志,等.施氮量对糯玉米产量及土壤氮动态的影响[J].华北农学报,2008,23(增刊):283-285. WU W Q, HE J D, ZHAO Y Z, et al. Effect of nitrogen fertilizer on waxy corn yield and soil nitrogen dynamics[J]. *Acta Agric Boreali-Sinica*, 2008, 23(Suppl):283-285.
- [24] 金继运,何萍,刘海龙,等.氮肥用量对高淀粉玉米和普通玉米吸氮特性及产量和品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2004,10(6):568-573. JIN J Y, HE P, LIU H L, et al. Comparison of nitrogen absorption, yield and quality between high-starch and common corn as affected by nitrogen application[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(6):568-573.
- [25] 吕丽华,赵明,赵久然,等.不同施氮量下夏玉米冠层结构及光合特性的变化[J].中国农业科学,2008,41(9):2624-2632. LÜ L H, ZHAO M, ZHAO J R, et al. Canopy structure and photosynthesis of summer maize under different nitrogen fertilizer application rates[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(9):2624-2632.
- [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. ZHU Z L, WEN Q X. Soil nitrogen in China[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1990.
- [27] 杨学云,张树兰,袁新民,等.长期施肥对填土硝态氮分布、累积和移动的影响[J].植物营养与肥料学报,2001,7(2):134-138. YANG X Y, ZHANG S L, YUAN X M, et al. A long-term experiment on effect of organic manure and chemical fertilizer on distribution, accumulation and movement of NO₃⁻-N in soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001, 7(2):134-138.
- [28] 李世清,王瑞军,李紫燕,等.半干旱半湿润农田生态系统不可忽视的土壤氮库——土壤剖面中累积的硝态氮[J].干旱地区农业研究,2004,22(4):1-13. LI S Q, WANG R J, LI Z Y, et al. Soil nitrogen pool not to be ignored residual NO₃⁻-N accumulated in soil profile in semi arid and semihumid agro-ecological system[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2004, 22(4):1-13.
- [29] 郭丽,史建硕,王丽英,等.滴灌水肥一体化条件下施氮量对夏玉米氮素吸收利用及土壤硝态氮含量的影响[J].中国生态农业学报,2018,26(5):668-676. GUO L, SHI J S, WANG L Y, et al. Effects of nitrogen application rate on nitrogen absorption and utilization in summer maize and soil NO₃⁻-N content under drip fertigation[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(5):668-676.
- [30] 王兴仁,张福锁,ODOWSKIR R.石灰性潮土对氮肥连续施用的环境承受力[J].北京农业大学学报,1995,21(增刊):94-98. WANG X R, ZHANG F S, ODOWSKIR R. Environment capacity of calcareous meadow soil to nitrogen fertilizer applied continuously[J]. *Journal of Beijing Agricultural University*, 1995, 21(Suppl):94-98.
- [31] 高超,张桃林.欧洲国家控制农业养分污染水环境的管理措施[J].农村生态环境,1999,15(2):50-53. GAO C, ZHANG T L. Management measures for controlling agricultural nutrient pollution of water environment in European countries[J]. *Rural Ecological Environment*, 1999, 15(2):50-53.
- [32] STEINSHAMN H, THUEN E, BLEKEN M A, et al. Utilization of nitrogen(N) and phosphorus(P) in an organic dairy farming system in Norway[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2004, 104(3):509-522.
- [33] OEENE O, LOWIE V L, OSCAR S. Effects of lowering nitrogen and phosphorus surpluses in agriculture on the quality of groundwater and surface water in the Netherlands[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 304(1/2/3/4):289-301.
- [34] 国家环境保护总局.关于印发《生态县、生态市、生态省建设指标(修订稿)》的通知[EB/OL].(2007-12-26)[2021-03-19]. https://www.mee.gov.cn/gkml/zj/wj/200910/t20091022_172492.htm. State Environmental Protection Administration. Notice on printing and distributing the Construction Indicators of Ecological Counties, Ecological Cities and Ecological Provinces (Revised version) [EB/OL]. (2007-12-26)[2021-03-19]. https://www.mee.gov.cn/gkml/zj/wj/200910/t20091022_172492.htm.
- [35] 环境保护部.关于印发《国家级生态乡镇申报及管理规定(试行)》的通知[EB/OL].(2010-06-24)[2021-03-19]. http://sthjj.jinhua.gov.cn/art/2015/8/18/art_1229168483_2827872.html. Ministry of Environmental Protection. Notice on printing and distributing the Provisions on the Application and Management of National Ecological Villages and Towns(Trial)[EB/OL]. (2010-06-24)[2021-03-19]. http://sthjj.jinhua.gov.cn/art/2015/8/18/art_1229168483_2827872.html.