

DOI: 10.11766/trxb202104070019

郑文琦, 谭文峰, 刘昭, 王凌云, 郑海金. 氮肥减施对红壤旱坡花生地氮素径流和渗漏损失及表观平衡的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59 (6): 1540–1550.

ZHENG Wenqi, TAN Wenfeng, LIU Zhao, WANG Lingyun, ZHENG Haijin. Effect of Reduced Nitrogen Fertilization on Nitrogen Runoff Loss and Apparent Balance on Red-soil Dry Slope Peanut Land[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59 (6): 1540–1550.

氮肥减施对红壤旱坡花生地氮素径流和渗漏损失及表观平衡的影响*

郑文琦^{1, 2}, 谭文峰¹, 刘 昭^{2, 3}, 王凌云^{2, 3}, 郑海金^{2, 3†}

(1. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430000; 2. 江西省水利科学院, 南昌 330029; 3. 江西省土壤侵蚀与防治重点实验室, 南昌 330029)

摘 要: 针对红壤旱坡地土壤侵蚀严重和渗漏淋溶强烈并存的现状, 为探讨减量施氮对作物产量、氮素径流和渗漏损失特征及氮素表观平衡的影响, 选择赣北红壤旱坡花生地开展田间随机区组试验, 设置 5 个处理: 100% 施氮量 ($N_{100\%}$, 纯施氮 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、减 1/6 施氮量 ($N_{1/6}$)、减 1/3 施氮量 ($N_{1/3}$)、减 1/2 施氮量 ($N_{1/2}$) 和不施氮 (N_0), 每个处理重复 3 次。结果表明: (1) 与 $N_{100\%}$ 处理相比, $N_{1/6}$ 和 $N_{1/2}$ 处理的花生产量和植株吸氮量略低, 但差异不显著 ($P > 0.05$); 与 $N_{100\%}$ 处理相比, $N_{1/6}$ 和 $N_{1/2}$ 处理在主茎长、株高、冠幅、饱果数和原始分枝数等农艺性状上无显著性差异 ($P > 0.05$)。 (2) 与 $N_{100\%}$ 处理相比, $N_{1/6}$ 、 $N_{1/3}$ 、 $N_{1/2}$ 和 N_0 处理显著 ($P < 0.05$) 降低了地表径流 TN 平均浓度, 降幅分别为 14.36%、26.35%、14.01% 和 21.34%; 与 $N_{100\%}$ 处理相比, $N_{1/3}$ 、 $N_{1/2}$ 和 N_0 处理降低了渗漏 TN 平均浓度, 而 $N_{1/6}$ 处理提高了渗漏 TN 平均浓度。 (3) 有 $34.95 \sim 93.98 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 氮素流出该花生种植体系, 其中径流流失和渗漏淋失的氮量占 38.31%~70.50%, 高于气体等其他表观损失的氮量 (29.50%~60.63%)。这表明径流流失和渗漏淋失是红壤旱坡花生地氮素损失的重要途径。在新开垦土地上不施氮处理降低了土壤无机氮量而减氮施肥处理增加了土壤无机氮量, 增加幅度达 18.66%~31.44%, 减氮施肥可以提高土壤肥力。综合生产目标、环境影响及土壤肥力来看, 红壤旱坡花生地推荐施氮水平为 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

关键词: 减氮施肥; 红壤坡耕地; 径流流失; 淋失; 氮平衡; 花生产量

中图分类号: S157.1 文献标志码: A

Effect of Reduced Nitrogen Fertilization on Nitrogen Runoff Loss and Apparent Balance on Red-soil Dry Slope Peanut Land

ZHENG Wenqi^{1, 2}, TAN Wenfeng¹, LIU Zhao^{2, 3}, WANG Lingyun^{2, 3}, ZHENG Haijin^{2, 3†}

* 国家自然科学基金项目 (4176106, 42067020)、江西省重点研发计划项目 (20192BBF60058) 和江西省水利科技计划项目 (201821ZDKT20) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41761060 and 42067020), the Provincial Key Research and Development Program of Jiangxi (No. 20192BBF60058) and the Science Foundation of Jiangxi Provincial Water Conservancy Department (No. 201821ZDKT20)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: haijinzheng@163.com

作者简介: 郑文琦 (1998—), 女, 内蒙古乌兰察布市人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail: wenqizheng1998@163.com

收稿日期: 2021-04-07; 收到修改稿日期: 2021-10-19; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2022-01-17

(1. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430000, China; 2. Jiangxi Academy of Water Science and Engineering, Nanchang 330029, China; 3. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Soil Erosion and Prevention, Nanchang 330029, China)

Abstract: 【Objective】 Severe soil erosion and water leakage on dry slopes of red soils are a common phenomenon that results in significant nitrogen loss. These occurrences cause nitrogen imbalance and subsequent yield losses. This study aimed to explore the effects of different levels of reduced nitrogen fertilization on crop yield and nitrogen loss characteristics. 【Method】 Randomized field trials comprising of five nitrogen treatments in three replicates were set up in peanut fields located in the dry slopes of northern Jiangxi characterized by red soils. The five treatments were 100% nitrogen application rate ($N_{100\%}$, pure nitrogen application of $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), $1/6(N_{1/6})$, $1/3(N_{1/3})$, $1/2(N_{1/2})$, and zero (N_0) nitrogen application rates. 【Result】 The peanut yield and plant nitrogen uptake of $N_{1/2}$ and $N_{1/6}$ treatments were insignificantly lower than those of the $N_{100\%}$ treatment ($P > 0.05$). Besides, $N_{1/6}$ and $N_{1/2}$ treatments had no significant differences in agronomic characteristics such as the main stem length, plant height, crown width, number of full fruits, and the number of original branches ($P > 0.05$). $N_{1/6}$, $N_{1/3}$, $N_{1/2}$, and N_0 treatments significantly reduced the average total nitrogen (TN) concentration in the surface runoff by 14.36%, 26.35%, 14.01%, and 21.34%, respectively, compared to the $N_{100\%}$ treatment ($P < 0.05$). Also, $N_{1/3}$, $N_{1/2}$, and N_0 treatments reduced the average TN concentration in the leakage compared to the $N_{100\%}$ treatment. However, the average increase in TN leakage concentration in the $N_{1/6}$ treatment was not significantly different from that of the $N_{100\%}$ treatment ($P > 0.05$). The nitrogen output from the peanut planting system ranged between 34.95 and $93.98 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. Nitrogen losses from runoff and leakage ranged between 38.31% and 70.50%, while other apparent nitrogen losses such as gaseous losses ranged between 29.50% and 60.63%. 【Conclusion】 This finding affirmed the significance of nitrogen loss through runoff and leakage. Non-nitrogen treatment on newly reclaimed land reduced the soil inorganic nitrogen while reduced-nitrogen fertilization increased the soil inorganic nitrogen by up to 18.66%–31.44%. Thus, reduced nitrogen fertilization could maintain a constant soil fertility level. Based on the comprehensive production goals, environmental impacts, and soil fertility, $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ is the recommended nitrogen application rate for peanuts planted in dry slope land with red soils.

Key words: Reduced nitrogen fertilization; Red-soil slope land; Runoff loss; Leaching loss; Nitrogen balance; Peanut yield

南方红壤区作为全国油料作物主产区之一，对保障国家粮油安全具有重要的战略地位^[1]。花生是我国南方红壤区重要的油料经济作物，种植面积和产量均位居全国前列^[2]；据统计，2017年、2018年全国花生种植面积分别为460.77万、461.97万 hm^2 ，产量依次为1709万、1733万t，均居世界首位。花生是红壤旱坡地春夏季主栽作物，氮肥投入量高，种植期恰逢雨季，水土流失严重且土壤淋溶作用强烈，氮素容易随地表径流泥沙或深层渗漏进入水体，导致地表水和地下水污染等环境问题^[3]。对此，《全国农业可持续发展规划（2015—2030年）》提出“以减量施肥用药、红壤改良、水土流失治理为重点，发展生态农业、特色农业和高效农业”。在保证花生生产量和品质的前提下，研究红壤旱坡花生地减量施肥技术、减少环境污染具有现实意义。

国内外学者围绕氮肥减施已经开展了大量研

究^[4-6]，取得了丰硕成果，但集中在玉米、水稻、小麦等作物^[5]，对本身可以固氮的花生的相关研究还不够深入。花生与根瘤菌共生，其氮素营养特性与其他作物不同^[7]；且现有研究多集中在减量施氮对花生产量、农艺性状及氮素积累量的影响^[6, 8-11]，不仅缺少对氮素随径流和渗漏等损失途径的同步研究（环境影响），还缺少对土壤残留等整个花生季氮素平衡的研究（土壤肥力），而“减肥”需要综合考虑生产目标、环境影响及土壤肥力的协调^[12]。此外，已有“减氮”试验大部分是在原来过量施氮的田块进行，由于残留肥料氮较高，有时还可能维持1~3季甚至1~3年，对指导生产意义有所局限^[12]。为明确减氮施肥对花生生产目标、环境影响及土壤肥力的综合影响，本试验在赣北第四纪红壤新开垦的小区开展，探究花生种植过程中作物产量差异、氮素径流和渗漏损失特征以及氮素表观平衡，为红壤旱

坡地豆科作物的合理施肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验布设在江西省北部德安县城郊的江西水土保持生态科技园 (29°10′—29°35′ N, 115°23′—115°53′ E), 属于亚热带湿润季风气候区, 年气温 16.7 °C, 年日照时数 1 650~2 100 h, 年无霜期 249 d; 年降水量 1 436.8 mm (2001—2018), 且集中在 4—8 月, 占全年降水量的 62.93%。该园地处我国南方红壤的中心分布区域, 土壤主要为第四纪红黏土发育的红壤, 呈酸性至微酸性; 因濒临鄱阳湖, 坡耕地分布集中, 春夏季农作物主要为花生等。试验地土壤基本理化性状为: 有机质含量为

5.76 g·kg⁻¹, 全氮含量为 0.56 g·kg⁻¹, 铵态氮含量为 2.83 mg·kg⁻¹, 硝态氮含量为 5.34 mg·kg⁻¹, 碱解氮含量为 42.36 mg·kg⁻¹, 全磷含量为 0.19 g·kg⁻¹, 速效磷含量为 3.54 mg·kg⁻¹, 黏粒、粉粒和砂粒含量分别为 22.03%、64.61%和 13.36%, 质地为黏壤土 (美国制)。在原荒草地上新建 15 个试验小区, 可收集地表径流泥沙、0~60 cm 壤中流和 60 cm 以下深层渗漏 (图 1)。每个小区宽 1 m、长 2 m, 坡度均为 8°; 小区之间设有宽 0.5 m、长 2 m 的隔离带。在每个试验小区周边设置砖砌围埂, 围埂高出地表 30 cm、埋入地下 60 cm, 以防止串流; 小区下部修筑集水槽承接小区径流泥沙, 并通过 PVC 管引入加盖的径流桶。同时, 每个小区的集流槽配有彩钢盖板以防止雨水进入。

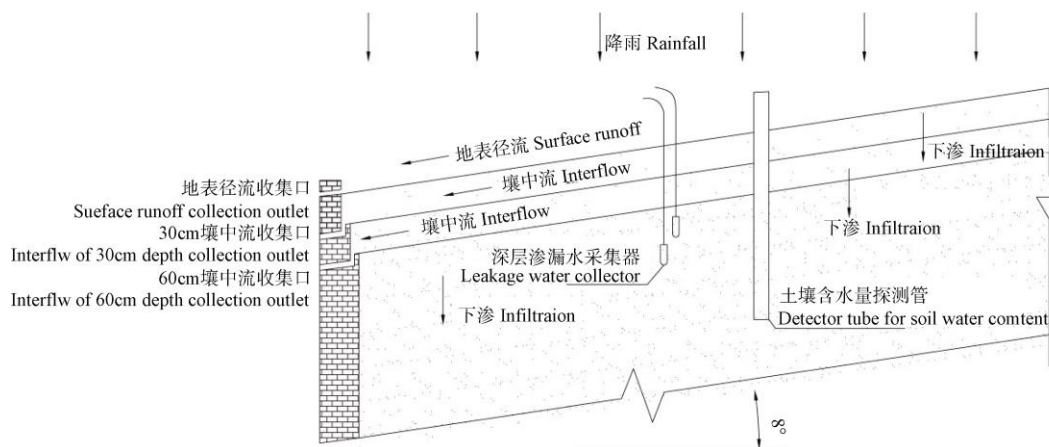


图 1 试验小区示意图

Fig. 1 Diagram of the runoff plot

1.2 试验设计

参考当地高量施肥水平与田间管理实际, 设置 5 种施氮水平处理: 100% 施氮量 ($N_{100\%}$, 纯施氮 180 kg·hm⁻²)、减 1/6 施氮量 ($N_{1/6}$, 纯施氮 150 kg·hm⁻²)、减 1/3 施氮量 ($N_{1/3}$, 纯施氮 120 kg·hm⁻²)、减 1/2 施氮量 ($N_{1/2}$, 纯施氮 90 kg·hm⁻²) 和不施氮量 (N_0), 每个处理重复 3 次, 随机分区组排列; 磷肥和钾肥按五氧化二磷 75 kg·hm⁻²、氧化钾 150 kg·hm⁻² 水平施用。所有肥料

混匀后撒施在小区内再翻耕土壤, 翻耕深度为 20 cm。花生品种为纯杂 1016, 采取穴播方式, 按行距 30~33 cm、穴距 15~17 cm、穴深 4~5 cm, 每个小区种植花生 9 行、3 列共 27 穴, 每穴定苗 2 株。花生于 2019 年 5 月 8 日播种, 8 月 20 日收获。

1.3 测定指标与方法

(1) 产流产沙量。在花生整个生长期进行逐场次降雨条件下的产流、产沙观测。降雨量采用试验地旁设置的虹吸式自记雨量计进行监测; 地表径流

量和 0~60 cm 壤中流量根据径流桶中水位采用预先率定的水位-体积关系计算获取, 并采用烘干法测定地表径流含沙水样计算次降雨事件侵蚀泥沙量。60 cm 以下深层渗漏量根据水量平衡原理计算^[13], 计算公式为:

深层渗漏量 (mm) = 降雨量 - 地表径流量 - 壤中流量 - 蒸散发 - 土体水增量

式中, 花生蒸散发通过试验地旁的 SOILSCOPE 大型自动称重式蒸渗仪测定, 土体水增量采用 TRIME-PICO-IPH TDR 剖面土壤水分测量系统测量。本文中的渗漏量包括 0~60 cm 壤中流量和 60 cm 以下深层渗漏量两部分。

(2) 氮素含量与氮素输出量。每次产流结束后, 待径流桶中水样静置 4 h 后采集 500 mL 上清液装瓶用于测定水相全氮 (TN) 含量, 径流桶底部泥沙全部取出称重并用塑封袋收集 500 g 泥沙样风干过 100 目筛用于测定侵蚀泥沙相 TN 含量, 采用自流式和真空式渗漏水采集装置采集渗漏水样用于测定渗漏水 TN 含量。所有样品 TN 含量由通过计量认证的江西水土保持生态科技园分析测试中心测定。水样现场加酸稳定立即带回分析测试中心置于 4 °C 冰箱保存, 在 72 h 内分析完毕。TN 径流流失量、TN 渗漏淋失量等参照文献^[14], 计算公式为:

$$Q = \sum_{i=1}^n C_i \times V_i \times 10$$

式中, Q 为 TN 径流/渗漏损失量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); C_i 为每次径流/渗漏水 TN 浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); V_i 为每次径流/渗漏水体积 ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$)。本文中的 TN 径流流失量包括地表径流水相和侵蚀泥沙相两部分。

(3) 花生产量及农艺性状。花生收获时 (8 月 20 日) 按实收统计秸秆产量、荚果产量和总干物质质量, 精度 0.1 g。同时, 在各小区按 S 形选择 10 穴、每穴 2 株植物全样, 测量并记录各植株的主茎长、株高、冠幅、饱果数和原始分枝数等农艺性状; 分别取植株的叶、茎、根、果壳、果仁在 105 °C 杀青

30 min, 70 °C 烘至恒重, 称重, 记录干物质重。烘干的植株分器官样品经粉碎过 0.25 mm (60 目) 筛, 用于测定花生植株 TN 含量, 并根据各器官干物质质量计算植株氮素积累量。

(4) 土壤铵氮 ($\text{NH}_4^+ \text{-N}$) 和硝氮 ($\text{NO}_3^- \text{-N}$) 含量。花生收获后按 0~5、5~10、10~15、15~20、20~30、30~40、40~60、60~80 和 80~100 cm 土层深度多点采集土壤样品, 并将同一采样深度的土样混匀后取部分鲜土测定 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量; 同时, 取环刀样测定土壤容重。土壤 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量测定方法参照文献^[15], 计算公式为:

$$\text{NH}_4^+ \text{-N} / \text{NO}_3^- \text{-N 含量} (\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) = \text{NH}_4^+ \text{-N} / \text{NO}_3^- \text{-N 浓度} \times \text{容重} \times \text{土层厚度} \times \text{小区面积}$$

(5) 氮素表观平衡计算。花生地氮素平衡等指标的计算参照文献^[16]。需要说明的是, 氮素矿化量是用未施氮处理氮素矿化量进行估计, 即不考虑氮肥的激化效应。由于该处理未施用氮肥就没有氮肥的其他损失, 故可以差减法计算氮素矿化量, 计算公式为:

$$\text{氮素矿化量} = \text{总输出量} - (\text{肥料氮} + \text{播前土壤无机氮} + \text{种子输入氮} + \text{降雨输入氮})$$

1.4 数据分析

本文采用 Excel 2016 和 SPSS 21.0 软件进行数据处理, 用 Origin 8.5 和 Excel 2016 作图。文中所列数据均为 3 次重复平均值, 各处理的比较采用最小显著差法 (LSD)。

2 结果

2.1 不同减氮水平下花生生物量与氮素积累量

作物对氮素的吸收表现为氮素积累量。从花生收获时统计的植株实收生物量及其吸氮量数据来看 (表 1), 荚果、秸秆产量和植株氮素积累量表现出一致的趋势。与 $\text{N}_{100\%}$ 处理相比, $\text{N}_{1/6}$ 和 $\text{N}_{1/2}$ 处理在荚果产量、秸秆产量、总干物质质量和植株氮素积累

量方面均无显著性差异 ($P>0.05$), 但 $N_{1/3}$ 处理显著降低了荚果产量、总干物质质量和植株氮素积累量 ($P<0.05$), 而 N_0 处理显著降低了荚果产量、秸秆产量、总干物质质量及植株氮素积累量 ($P<0.05$)。

农艺性状特征可以反映不同施氮水平下的作物生长情况。从花生收获时的农艺性状指标可知 (表 2), 与 $N_{100\%}$ 处理相比, $N_{1/6}$ 、 $N_{1/3}$ 和 $N_{1/2}$ 处理在主茎长、株高和冠幅等农艺性状上无显著性差异 ($P>0.05$), 但 $N_{1/3}$ 处理显著降低了饱果数和原始分枝数 ($P<0.05$), 而 N_0 处理显著降低了几乎所有的农艺性状指标 ($P<0.05$), 严重限制了花生的生长。

2.2 不同减氮水平下氮素径流和渗漏损失特征

降雨是导致坡地农田养分随地表径流泥沙或深层渗漏损失的主要原因。试验期共发生 16 次降雨事件, 总降雨量为 518.5 mm, 占全年降雨量

(1 536.0 mm) 的 33.76%, 占当地花生生育期多年 (2001—2018) 平均降雨量的 35.90%。其中: 侵蚀降雨场次 12 次, 侵蚀性降雨量 437.2 mm, 占同期降雨量的 84.32%。花生生长季各处理产流产沙量如表 3 所示, 不同施氮水平下的地表径流量和侵蚀泥沙量显著相关 ($P<0.05$)。与 $N_{100\%}$ 处理相比, $N_{1/2}$ 处理降低了地表径流量、侵蚀泥沙量、渗漏量和地表径流系数, 而 $N_{1/6}$ 、 $N_{1/3}$ 和 N_0 处理提高了地表径流量、侵蚀泥沙量和地表径流系数。这是因为, $N_{1/6}$ 、 $N_{1/3}$ 和 N_0 处理的花生植株生物量 (表 1) 和农艺性状 (表 2) 劣于 $N_{1/2}$ 和 $N_{100\%}$ 处理, 较差的植被覆盖难以很好地涵养水源、削弱降雨和减缓径流流速^[17], 从而导致较高的径流泥沙输出。

表 1 不同施氮水平下花生生物量及氮素积累量

Table 1 Peanut biomass and nitrogen accumulation under different nitrogen levels

处理 Treatment	荚果产量 Pod yield/ (kg·hm ⁻²)	秸秆产量 Straw yield/ (kg·hm ⁻²)	总干物质质量 Total dry matter quality/ (kg·hm ⁻²)	植株氮素积累量 Plant nitrogen accumulation/ (kg·hm ⁻²)
$N_{100\%}$	4 526±1 400a	3 808±545a	8 334±1902a	244.5±58.2a
$N_{1/6}$	3 340±551ab	3 074±241ab	6 415±791ab	196.3±22.8ab
$N_{1/3}$	2 663±830b	2 942±686ab	5 606±1 475b	168.9±14.3b
$N_{1/2}$	3 837±1 037ab	3 016±386ab	6 853±1 424ab	196.9±56.6ab
N_0	2 661±397b	2 478±463b	5 139±830b	158.6±19.7b

注: 表中数据为平均值±标准差; 同列不同字母表示各处理之间差异显著, LSD 检验 ($P<0.05$)。下同。Note: The data in the table are the mean ± standard deviation; different letters in the same column indicate significant differences between treatments, LSD test ($P<0.05$) .

表 2 不同施氮水平下花生农艺性状

Table 2 Agronomic characteristics of peanuts under different nitrogen levels

处理 Treatment	主茎长 Main stem length/cm	株高 Plant height/cm	冠幅 Crown width/cm	饱果数 Number of full fruits/piece	原始分枝数 Number of original branches
$N_{100\%}$	25.60±3.53a	38.07±4.20a	44.90±1.57a	22.83±5.08a	10.03±0.57a
$N_{1/6}$	19.90±4.16ab	31.07±4.26ab	42.60±1.04ab	18.47±3.97ab	8.33±0.74ab
$N_{1/3}$	19.90±5.17ab	31.73±5.21ab	37.37±2.45ab	12.91±4.00b	6.93±2.05b
$N_{1/2}$	26.83±1.81a	39.57±3.12a	44.33±3.47a	18.77±4.65ab	8.70±0.35ab
N_0	17.43±2.02b	29.77±1.63b	36.02±1.70b	12.73±1.63b	6.80±0.66b

表 3 不同施氮水平下花生生长季产流产沙情况

Table 3 Runoff and sediment yield in peanut growing season under different nitrogen levels

处理 Treatment	地表径流量 Surface runoff / (m ³ ·hm ⁻²)	泥沙量 Sediment volume / (kg·hm ⁻²)	渗漏量 Leakage / (m ³ ·hm ⁻²)	地表径流系数 Surface runoff coefficient/%
N _{100%}	889±386a	12 811±2 284a	2 373±164ab	14.3±4.7a
N _{1/6}	1 059±171a	12 923±4 068a	2 333±292ab	15.3±2.2a
N _{1/3}	1 117±307a	15 241±5 316a	2 522±349a	17.6±9.6a
N _{1/2}	871±155a	11 138±4 679a	2 249±242ab	14.0±0.5a
N ₀	1 314±340a	16 628±3 532a	1 775±714b	17.9±3.0a

试验期 12 次侵蚀性降雨下各处理地表径流和渗漏 TN 平均浓度如图 2 所示。可知，地表径流 TN 平均浓度为 1.56~2.11 mg·L⁻¹。N_{100%}处理地表径流平均 TN 浓度最高，达 2.11 mg·L⁻¹，已超过《地表水环境质量标准》(GB3838—2002) V 类水标准值 (2 mg·L⁻¹)，为劣五类水，进入河湖极易引起水体富营养化。与 N_{100%}处理相比，N_{1/6}、N_{1/3}、N_{1/2} 和 N₀处理显著降低了地表径流 TN 平均浓度 ($P<0.05$)，降幅分别达 14.36%、26.35%、14.01% 和 21.34%。这说明施肥量是影响氮素径流流失浓度的重要因素

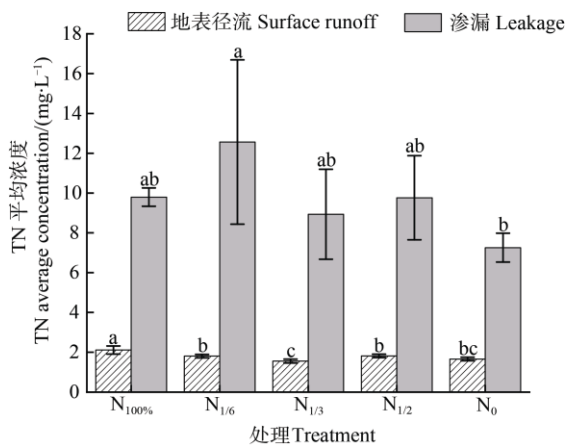


图 2 不同施氮水平下花生地地表径流和渗漏 TN 浓度
Fig. 2 TN concentration in peanut field through surface runoff and leakage under different nitrogen levels

之一，合理的氮肥减施可有效削减花生地氮素的径流流失。渗漏 TN 平均浓度为 7.26~12.56 mg·L⁻¹ (图 3)，其中 N_{100%}处理渗漏 TN 平均浓度达

9.76 mg·L⁻¹。与 N_{100%}处理相比，N_{1/3}、N_{1/2} 和 N₀处理降低了渗漏 TN 平均浓度，而 N_{1/6}处理提高了渗漏 TN 平均浓度，但 N_{1/6}与 N_{100%}处理之间差异不显著 ($P>0.05$)。不同施氮水平下渗漏 TN 平均浓度均在《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017) III 类标准值以下，对地下水威胁不大。在本试验中，各处理渗漏 TN 平均浓度均大于地表径流 TN 平均浓度，可能是由于本试验采取撒施后翻耕覆土的施肥方式，而且地表径流在坡面输移过程中，经花生植株拦截、土壤和泥沙吸附等作用，其氮素浓度相应地有所降低^[17]。

各处理的 TN 输出通量如图 3 所示，TN 径流流失量在 7.15~12.26 kg·hm⁻²之间。N_{100%}处理下，花生地 TN 径流流失量达 9.43 kg·hm⁻²，N_{1/6}、N_{1/3} 和 N_{1/2} 处理与之相比分别降低了 8.59%、2.97% 和 24.18%，而 N₀提高了 TN 径流流失量，这主要是因为 N₀处理花生植株长势较差 (表 1、表 2)，造成较大的地表径流和侵蚀泥沙量 (表 3)。TN 渗漏淋失量在 9.59~28.65 kg·hm⁻²之间。N_{100%}处理下，花生地 TN 渗漏淋失量达 25.01 kg·hm⁻²，N_{1/2}、N₀处理与之相比分别减少了 29.28% 和 61.66%；N_{1/6}、N_{1/3} 处理 TN 渗漏淋失量虽高于 N_{100%}处理，但与 N_{100%}处理差异不显著 ($P>0.05$)。

2.3 不同减氮水平下土壤氮素剖面分布

花生收获后土壤 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 在 0~100 cm 剖面的分布如图 4 所示。NO₃⁻-N 不断向剖面

下层迁移(图 4a), 83.39%~93.82%的 NO_3^- -N 分布在 40~100 cm 土层, 而 NH_4^+ -N 随着土层的增加呈下降的趋势(图 4b), 这是由于 NH_4^+ -N 在土壤中的移动性较小。0~100 cm 土层的 NH_4^+ -N 含量以 $N_{1/3}$ 处理最大, $N_{100\%}$ 处理次之。与 $N_{100\%}$ 处理相比, $N_{1/6}$ 、 $N_{1/2}$ 和 N_0 处理降低了 0~100 cm 土层中 NH_4^+ -N 含量, 降幅达 12.74%、14.35% 和 1.88%。0~100 cm 土层的 NO_3^- -N 含量以 $N_{1/6}$ 处理最大, $N_{1/3}$ 处理次之。 $N_{1/6}$ 和 $N_{1/3}$ 处理 NO_3^- -N 含量在 0~100 cm 土层较 $N_{1/2}$ 处理分别增加了 15.93% 和 1.33%。

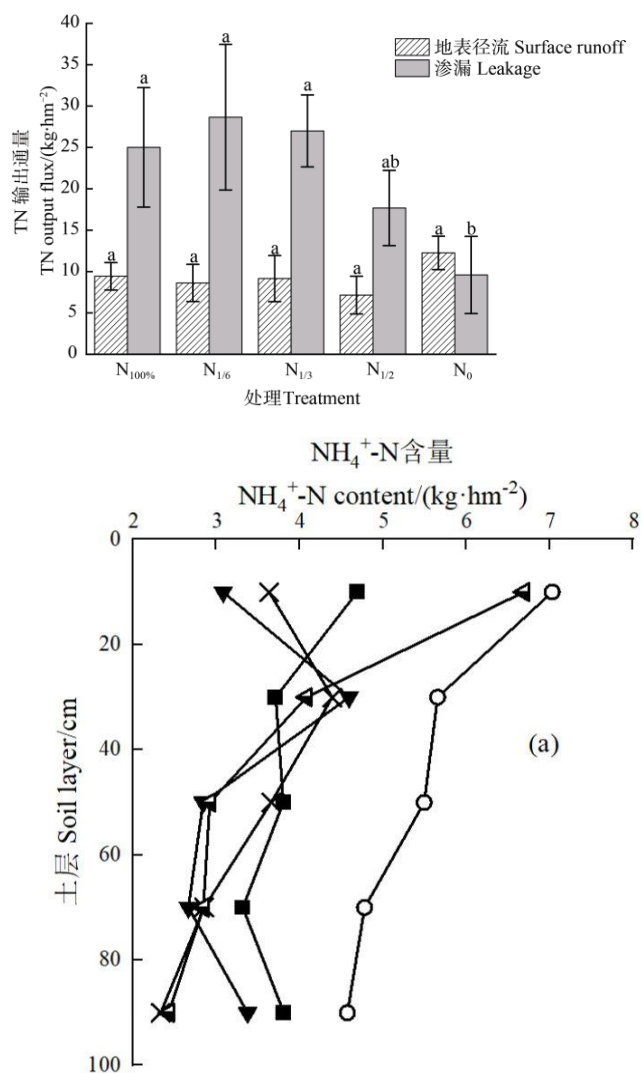


图 4 不同施氮水平下花生地 NH_4^+ -N (a) 和 NO_3^- -N (b) 在土壤剖面中的分布

Fig. 4 Distribution of NH_4^+ -N and NO_3^- -N in the soil profile of peanut field under different nitrogen levels

注: 图中径流 TN 输出通量包括地表径流水相和侵蚀泥沙相两部分。Note: The runoff TN output flux in the figure includes two parts: surface runoff water phase and erosion sediment phase.

图 3 不同施氮水平下花生地氮素随地表径流和渗漏的输出通量

Fig. 3 TN output in peanut field through surface runoff and leakage under different nitrogen levels

2.4 不同减氮水平下氮素表观平衡

氮平衡研究是评价生态系统中氮素循环和氮肥去向的有力工具, 也是研究土壤氮素利用与损失的常用方法之一。表 4 和图 5 列出了花生整个生长季的氮素平衡结果。试验地氮素收入项主要包括肥料投入、降水沉降、种子携带、土壤起始无机氮量 N_{\min} 和有机物质矿化氮量 5 项(表 4)。其中, 肥料施用是氮素收入的主要来源, 占 29.67%~45.76% (不含 N_0 处理); 由降水输入和种子自身携带的氮量分别为 6.09 和 11.56 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 是该种植体系氮素输入不可忽视的组成部分; 本试验中, 各处理土壤起始 N_{\min} 和矿化氮量分别为 59.31 和 136.40 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,

表 4 不同施氮水平下花生地整个生长季的氮素平衡

Table 4 Nitrogen balance in the whole growing season of peanut under different nitrogen levels / (kg·hm⁻²)

项目 Item	N _{100%}	N _{1/6}	N _{1/3}	N _{1/2}	N ₀
A. 氮素输入 Nitrogen input					
1) 氮肥 Nitrogen fertilizer	180	150	120	90	0
2) 氮素矿化氮 Mineralization nitrogen	136.40	136.40	136.40	136.40	136.40
3) 土壤起始氮 Soil initial nitrogen	59.31	59.31	59.31	59.31	59.31
4) 降水氮 Precipitation nitrogen	6.09	6.09	6.09	6.09	6.09
5) 种子氮 Seed nitrogen	11.56	11.56	11.56	11.56	11.56
A. 总量 Total	393.36	363.36	333.36	303.36	213.36
B. 氮素输出 Nitrogen output					
1) 作物吸收 Crop adsorption	244.51	196.32	168.99	196.96	158.68
2) 土壤残留 Soil residue	73.50	77.78	70.38	71.44	32.85
3) 径流流失 Runoff loss	9.43	8.62	10.15	7.15	12.26
4) 渗漏淋失 Leakage loss	23.50	28.65	26.85	17.49	9.57
5) 气体等其他损失 Gas and other loss	42.42	51.98	56.99	10.32	0
6) 总损失 3+4+5 Total loss	75.35	89.25	93.99	34.96	21.83
B. 总量 Total	393.36	363.36	333.36	303.36	213.36

两者之和 (195.71 kg·hm⁻²) 即土壤供氮量超过施入的肥料氮量, 表明供试土壤具有一定的供氮能力。同时, 各施氮处理土壤残留无机氮量均大于土壤起始无机氮量, 增长幅度达 18.66%~31.44%, 所有施氮处理均提高了土壤肥力, 可以持续维持作物生长; 而 N₀ 处理的土壤残留氮小于土壤起始氮。

试验地氮素支出项主要包括作物吸收、土壤残留、径流流失、渗漏淋失和气体等其他损失 5 项 (图 5)。在所有施氮处理的氮素输出项中, 191.53~318.01 kg·hm⁻² 的氮被作物吸收和土壤残留; 34.96~93.99 kg·hm⁻² 的氮以径流流失、渗漏淋失和其他损失途径流出种植体系, 其中 TN 径流流失量介于 7.15~12.26 kg·hm⁻², TN 渗漏淋失量介于 9.57~28.65 kg·hm⁻²。在所有施氮处理中, N_{1/2} 处理 TN 径流流失量和 TN 渗漏淋失量均最小; TN 径流流失量最大的为 N_{1/3} 处理, TN 渗漏淋失量最大的为 N_{1/6} 处理, 这主要是因为 N_{1/3} 和 N_{1/6} 处理花生植株吸氮量少 (表 1), 造成大量的氮素随地表径流泥沙流失和渗漏淋失 (图 3)。关于 N_{1/3} 和 N_{1/6} 处理花生植株长势

和产量较差的原因在讨论部分详细展开叙述。

3 讨论

3.1 氮肥减施对花生产量与农艺性状的影响

世界范围内, 氮肥施用对提高作物产量、增加经济收益起了不可替代的作用^[18]。本试验结果显示: 与 N_{100%} 相比, N₀ 处理不仅显著降低了几乎所有的农艺性状指标 (表 2), 还显著降低了荚果产量、秸秆产量和干物质质量 (表 1), 同时 N₀ 处理降低了 44.61% 土壤起始氮量 (表 4、图 5), 说明在不施氮的情况下花生植株生长消耗了土壤氮, 长期下去必然消耗地力, 影响农作物产量和品质。这表明虽然根瘤菌固氮在满足花生氮素需求及提高产量方面有一定作用, 但花生自身的固氮作用不能满足其高产对氮素营养的需求, 所以仍需施用适量氮肥。

氮肥的大量投入在提高产量和增加经济收益的同时也给环境带来了不利的影响, 特别在集约化农业生产中, 过量氮肥导致的经济损失和环境问题日

益严重^[19]。减量施肥作为一项有效的农田养分原位减排技术,目前正在大力推广应用于生产实践中,如玉米、水稻、小麦等种植体系。在本试验中, $N_{1/2}$ 处理的花生产量、植株氮素积累量和农艺性状均优于 $N_{1/6}$ 、 $N_{1/3}$ 处理(表1和表2),这与已有研究如水稻的氮素积累量随着施氮量增加而增加^[20]不完全一致。究其原因,可能是因为花生与根瘤菌共生,其氮素营养特性与水稻等非固氮作物不同有关。 $N_{1/6}$ 、 $N_{1/3}$ 处理产量降低可能与土壤中高 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量导致花生固氮作用降低等有关。如图4所示, $N_{1/3}$ 处理的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量在0~20 cm土层(花生主根区)分别较 $N_{100\%}$ 和 $N_{1/2}$ 处理增加了49.84%和127.90%,且 $N_{1/6}$ 处理的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量在0~20 cm土层(花生主根区)分别较 $N_{100\%}$ 和 $N_{1/2}$ 处理增加了70.02%和59.32%。已有研究发现土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 均会降低根瘤鲜重,抑制根瘤固氮酶活性^[21]。硝态氮可以作为重要的信号分子调控植物对氮素的响应、吸收、代谢相关基因的表达。当土壤中存在高浓度的硝酸盐时,抑制了豆科植物与根瘤菌间的共生固氮作用,从而影响植物的生长和发育^[22]。

3.2 氮肥减施对径流与渗漏污染的影响

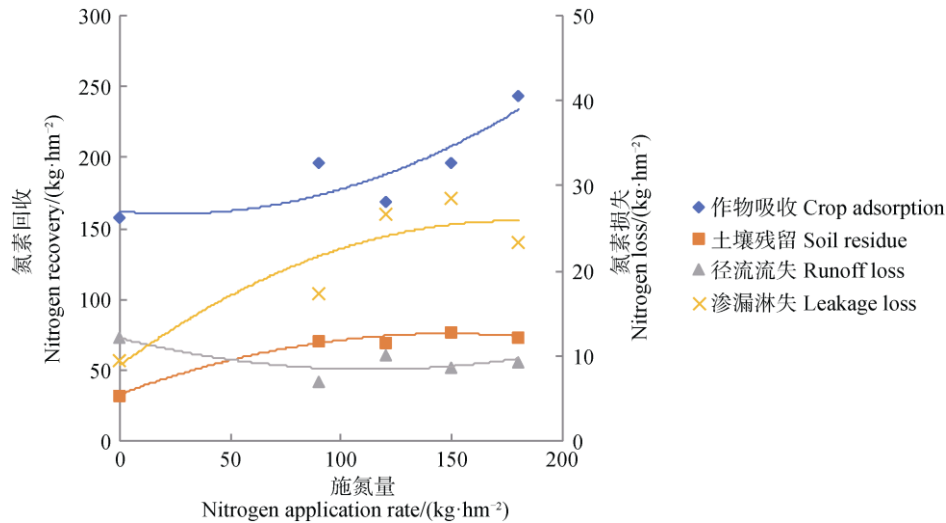
在本试验中,各处理渗漏TN平均浓度均在地下水III类标准值(20 mg/L)以下,对地下水威胁不大;而各处理地表径流TN平均浓度均超地表IV类水标准值(1.5 mg·L⁻¹),其中 $N_{100\%}$ 处理地表径流TN平均浓度已超过地表V类水标准值(2 mg·L⁻¹),进入河湖水体后存在诱发富营养化的风险。因此,在红壤旱坡花生地可以采取增加土壤入渗而降低地表径流的措施,如破除土壤表面的硬壳、喷施一定计量的化学物质(如土壤改良剂)等^[23]。氮素随径流输出通量不仅与TN浓度有关,还与产流产沙量有关。在本试验中, $N_{100\%}$ 处理TN径流流失量为9.43 kg·hm⁻², $N_{1/2}$ 处理TN径流流失量最小(7.15 kg·hm⁻²), N_0 处理TN径流流失量最大(12.26 kg·hm⁻²)。 $N_{100\%}$ 和 $N_{1/2}$ 处理的TN径流流失量较小,主要与该两种处理花生植株生物量高(表

1)、植株长势良好(表2),对径流携带的氮素等养分有拦截作用有关。因此,在红壤旱坡花生地还可以采取增加植被覆盖度的措施,如套种间种和营造植物篱等,达到减少地表径流产沙、从而减少氮素径流流失的效果。

3.3 氮肥减施对氮素表观平衡的影响

本试验观测结果表明:施氮越多花生种植体系输入的氮素就越多,肥料氮占总氮输入的29.67%~45.76%(不含 N_0);矿化氮和土壤起始 N_{min} 占氮素输入的49.75%~91.73%,说明该试验地有较强的供氮能力;肥料氮、矿化氮及土壤起始 N_{min} 是红壤旱坡花生地氮素输入的主要途径(91.73%~95.51%)。在施氮处理的氮素输出项中,渗漏淋失的氮占总损失量的28.57%~50.04%,径流流失的氮占总损失量的9.66%~20.45%,二者之和即为水体损失的氮量(39.37%~70.48%)高于气体等其他表观损失的氮量(29.57%~60.63%),表明渗漏淋失和径流流失是红壤旱坡花生地氮素损失的主要途径,与同类地区已有研究结果^[24]一致。因此,采取有效措施减少坡地农田氮素养分随径流和渗漏的损失,提高肥料利用率势在必行。

对红壤旱坡花生地氮素不同途径流失量(y)与施氮量(x)进行曲线拟合(图5)。花生植株的吸氮量和径流流失的氮素随着施氮量的增加呈先减小后增加的趋势,其相关方程分别为 $y=0.0030x^2-0.1464x+162.12$ ($R^2=0.7323$)和 $y=0.0003x^2-0.065x+12.09$ ($R^2=0.6435$)。土壤残留的氮素和渗漏淋失的氮素随着施氮量的增加呈先增加后减小的趋势,其相关方程分别为 $y=-0.0019x^2+0.5764x+33.049$ ($R^2=0.982$)和 $y=-0.0005x^2+0.1905x+8.9076$ ($R^2=0.8265$)。通过拟合曲线方程可以明确红壤旱坡花生地不同施氮量的氮素去向,回答花生氮素利用、环境影响及土壤演变指标方面的科学问题,为政策制定及应用提供数据支撑。



注：图中氮素回收分别为作物吸收和土壤残留，氮素损失分别为径流流失和渗漏淋失。Note: in the figure, the nitrogen recovery is crop absorption and soil residual, and the nitrogen loss is runoff loss and leakage loss.

图 5 不同施氮水平下花生地整个生长季的氮素输出及拟合曲线

Fig. 5 Nitrogen output and its fitting curve in the growing season of peanut under different nitrogen levels

3.4 红壤旱坡花生地合理施氮

减氮需要综合考虑生产目标、环境影响及土壤肥力的协调。本研究结果表明，与 $N_{100\%}$ 处理相比， $N_{1/2}$ 处理没有显著降低花生产量和农艺性状 ($P>0.05$) (生产目标)；与 $N_{100\%}$ 处理相比， $N_{1/2}$ 处理显著降低地表径流 TN 平均浓度 ($P<0.05$)，降幅达 14.01%。同时， $N_{1/2}$ 处理 TN 径流流失量和 TN 渗漏淋失量均最小 (环境影响)； $N_{1/2}$ 处理没有明显减少土壤残留量 (土壤肥力)。因此，推荐红壤旱坡花生地 $N_{1/2}$ 处理 ($90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

花生可以与根瘤菌固氮，与水稻、小麦、玉米等作物氮素营养特征不同，本研究结果表明花生地减氮施肥是必要的。合理施氮除了确定合理的施氮量 (Right amount) 外，还包括其他三个方面，即正确的肥料氮品种 (Right type)、正确的施氮时期 (Right time) 和正确的施氮位置 (Right place) (“4R”理念)。在今后的研究中，综合考虑“4R”技术和提高花生与根瘤菌的固氮能力将是未来研究的重点内容。

4 结 论

在所有减氮处理中， $N_{1/2}$ 处理在荚果产量、秸秆产量、总生物量、植株吸氮量、植株农艺性状均与高产施氮量 ($N_{100\%}$) 处理无显著性差异 ($P>0.05$)；在所有减氮处理中，只有 $N_{1/2}$ 处理有效降低了径流 TN 平均浓度、TN 径流流失量、渗漏 TN 平均浓度和 TN 渗漏流失量；各施氮处理土壤残留无机氮量均大于土壤起始无机氮量，增长幅度达 18.66%~31.44%，可以供下季花生生长利用，而 N_0 处理降低 44.61% 土壤起始氮量，难以维持花生的长期种植。综合生产目标、环境影响及土壤肥力来看，红壤旱坡花生地施氮量建议以 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 为宜。

参考文献 (References)

- [1] Huang G Q, Zhao Q G. Initial exploration of red soil ecology[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34 (18): 5173—5181. [黄国勤, 赵其国. 红壤生态学[J]. 生态学报, 2014, 34 (18): 5173—5181.]
- [2] Wu Q H, Wang Y, Zhao Y N, et al. Effects of NPK ratio on yield, nutrient absorption and economic benefit of high-yielding summer peanut in a fluvo-aquic soil[J].

- Soil and Fertilizer Sciences in China, 2019 (2): 98—104. [武庆慧, 汪洋, 赵亚南, 等. 氮磷钾配比对潮土区高产夏播花生产量、养分吸收和经济效益的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019 (2): 98—104.]
- [3] Zhu B, Zhou M H, Kuang F H, et al. Measurement and simulation of nitrogen leaching loss in hillslope cropland of purple soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21 (1): 102—109. [朱波, 周明华, 况福虹, 等. 紫色土坡耕地氮素淋失通量的实测与模拟[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21 (1): 102—109.]
- [4] Li H C, Zhao N, Sha N, et al. Effects of reduced fertilization on yield and fertilizer use efficiency of maize under drip irrigation[J]. Journal of Northern Agriculture, 2017, 45 (6): 39—43. [李焕春, 赵娜, 莎娜, 等. 滴灌条件下减量施肥对玉米产量及肥料利用率的影响[J]. 北方农业学报, 2017, 45 (6): 39—43.]
- [5] Zhao Y N, Su M M, Lü Y, et al. Wheat yield, nutrient use efficiencies and soil nutrient balance under reduced fertilizer rate[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23 (4): 864—873. [赵亚南, 宿敏敏, 吕阳, 等. 减量施肥下小麦产量、肥料利用率和土壤养分平衡[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23 (4): 864—873.]
- [6] Yuan G, Zhang G C, Ding H, et al. Effect of reducing nitrogen fertilizer application on agronomic traits and yield of peanut in dry land[J]. Journal of Peanut Science, 2019, 48 (3): 30—35. [袁光, 张冠初, 丁红, 等. 减施氮肥对旱地花生农艺性状及产量的影响[J]. 花生学报, 2019, 48 (3): 30—35.]
- [7] Zhao X F, Fang Z G. Research progress on the relationship between nitrogen fixation and nitrogen application in soybean and peanut[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2005, 11 (3): 48—49. [赵秀芬, 房增国. 大豆、花生固氮与施氮关系的研究进展[J]. 安徽农学通报, 2005, 11 (3): 48—49.]
- [8] Wan S B, Feng H S, Zuo X Q, et al. Nitrogen use efficiency of peanuts with different nitrogen supply levels[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2000, 32 (1): 31—33. [万书波, 封海胜, 左学青, 等. 不同供氮水平花生的氮素利用效率[J]. 山东农业科学, 2000, 32 (1): 31—33.]
- [9] Lin X B, Zhou L J, Huang S S, et al. Changes of agronomic traits, yield and soil nutrient of red soil in Southern China under different nitrogen application rates[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2020, 41 (6): 1076—1083. [林小兵, 周利军, 黄尚书, 等. 不同施氮量下南方红壤花生农艺性状、产量及土壤养分的变化[J]. 热带作物学报, 2020, 41 (6): 1076—1083.]
- [10] Si X Z, Zhang X, Mao J W, et al. Effects of nitrogen application rate on peanut yield and quality and nitrogen utilization efficiency[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32 (29): 91—96. [司贤宗, 张翔, 毛家伟, 等. 施氮量对花生生产质量及氮肥利用率的影响[J]. 中国农学通报, 2016, 32 (29): 91—96.]
- [11] Sun H, Li S X, Wang Y F, et al. Effects of nitrogen application on source of nitrogen accumulation and yields of different peanut cultivars[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16 (1): 153—157. [孙虎, 李尚霞, 王月福, 等. 施氮量对不同花生品种积累氮素来源和产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16 (1): 153—157.]
- [12] Ju X T, Zhang C. The principles and indicators of rational N fertilization[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58 (1): 1—13. [巨晓棠, 张翀. 论合理施氮的原则和指标[J]. 土壤学报, 2021, 58 (1): 1—13.]
- [13] Liang H R, Li J T, Li Y L, et al. Deep leakage characteristics and water balance of irrigated farmland in ulan buh desert[J]. Journal of Desert Research, 2019, 39 (4): 187—194. [梁海荣, 李佳陶, 李艳丽, 等. 乌兰布和沙漠灌溉农田深层渗漏特征与水量平衡[J]. 中国沙漠, 2019, 39 (4): 187—194.]
- [14] Guo Z, Liu H J, Zhang Y F, et al. Effects of different fertilization modes on nitrogen loss by surface runoff and the apparent nitrogen balance in the vegetable fields of Taihu Lake region, China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32 (4): 37—42, 50. [郭智, 刘红江, 张岳芳, 等. 不同施肥模式对菜地氮素径流损失与表观平衡的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32 (4): 37—42, 50.]
- [15] Zhang H X, Zhou H P, Yang Z X, et al. Effect of long-term fertilization to distribution and accumulation of NO_3^- -N in dryland soil[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2014, 42 (5): 465—469. [张慧霞, 周怀平, 杨振兴, 等. 长期施肥对旱地土壤剖面硝态氮分布和累积的影响[J]. 山西农业科学, 2014, 42 (5): 465—469.]
- [16] Liu X J, Ju X T, Pan J R, et al. Nitrogen balance and nitrogen loss pathways in winter wheat-summer maize rotation[C]. Symposium on Nitrogen Cycle and Agriculture and Environment. 2001: 10. [刘学军, 巨晓棠, 潘家荣, 等. 冬小麦—夏玉米轮作中的氮素平衡与损失途径[C]. 氮素循环与农业和环境学术讨论会论文集. 2001: 10.]
- [17] Liang J Z. Characteristics of soil and water erosion on the slopes with different vegetation patterns in red soil region of Southern China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22 (4): 95—99. [梁娟珠. 南方红壤区不同植被措施坡面的水土流失特征[J]. 水土保持研究, 2015, 22 (4): 95—99.]
- [18] Raun W R, Johnson G V. Improving nitrogen use efficiency for cereal production[J]. Agronomy Journal, 1999, 91 (3): 357—363.
- [19] [19] Ju X T, Christie P. Calculation of theoretical nitrogen rate for simple nitrogen recommendations in

- intensive cropping systems: A case study on the North China Plain[J]. *Field Crops Research*, 2011, 124 (3): 450—458.
- [20] Zhang G L, Zhao R, Liu Y T, et al. Effect of different amount of nitrogen on the yield and the quality of high quality rice and its nitrogen utilization efficiency[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2019, 45 (3): 231—236. [张桂莲, 赵瑞, 刘逸童, 等. 施氮量对优质稻产量和稻米品质及氮素利用效率的影响[J]. *湖南农业大学学报 (自然科学版)*, 2019, 45 (3): 231—236.]
- [21] Song H X, Wang P, Shen S L. et al. Study on the relations between commensally nitrogen fixation and the total nitrogen content of leaves in soybean[J]. *Jilin Agricultural Sciences*, 2000, 25 (6): 9—11. [宋海星, 王萍, 申斯乐, 等. 大豆共生固氮与叶片全氮含量之间关系的研究[J]. *吉林农业科学*, 2000, 25 (6): 9—11.]
- [22] Luo Z P, Xie F. Mechanism of nitrate regulating symbiotic nitrogen fixation between legumes and *Rhizobium*[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2019, 35 (10): 34—39. [罗振鹏, 谢芳. 硝酸盐调控豆科植物与根瘤菌共生固氮的机制研究[J]. *生物技术通报*, 2019, 35(10): 34—39.]
- [23] Liu H J, Kang Y H. Effects of droplets kinetic energy on soil infiltration rate and surface runoff under sprinkler irrigation[J]. *Irrigation and Drainage*, 2002, 21 (2): 71—74, 79. [刘海军, 康跃虎. 喷灌动能对土壤入渗和地表径流影响的研究进展[J]. *灌溉排水*, 2002, 21 (2): 71—74, 79.]
- [24] He Y Q, Wang X X, Hu F, et al. Dynamic of soil nutrient and water loss in artificial forest in low hilly red soil region[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2002, 16 (4): 91—93, 97. [何园球, 王兴祥, 胡锋, 等. 红壤丘岗区人工林土壤水分、养分流失动态研究[J]. *水土保持学报*, 2002, 16 (4): 91—93, 97.]

(责任编辑: 檀满枝)