

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.06.007.

谢梅香, 金秋, 赵广举, 等. 坡耕地顺坡非均匀施肥对氮磷迁移及玉米生长的影响[J]. 水土保持研究, 2024, 31(6): 207-212.

Xie Meixiang, Jin Qiu, Zhao Guangju, et al. Effects of Nonuniform Fertilization on Nutrient Transport and Maize Growth in the Sloping Farmland [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(6): 207-212.

坡耕地顺坡非均匀施肥对氮磷迁移及玉米生长的影响

谢梅香, 金秋, 赵广举, 耿 韧, 洪大林

(南京水利科学研究院 农村水利研究所, 南京 210029)

摘 要: [目的] 分析坡耕地坡脚低肥、坡中中肥和坡顶高肥的顺坡非均匀施肥方式对土壤养分及玉米生长的作用, 为坡耕地科学的施肥方式提供依据。[方法] 通过布设野外径流小区和水样采集设备, 观测了坡耕地土壤中氮磷迁移和玉米对养分的吸收。[结果] (1) 降雨后坡脚的土壤含水量最高, 坡顶的土壤水分下降最快最多。(2) 整个玉米生长周期内土壤水氮向坡脚浅土层处迁移, 而土壤水总磷则呈峰值变化的趋势且以坡顶最为显著。(3) 非均匀施肥下玉米生长对氮素的吸收以及干物质产量都较好, 坡脚处的氮肥吸收率达到 51.3%, 磷肥吸收率达到 25.5%。[结论] 减少总施肥量的非均匀施肥方式能够保证玉米生长对肥料的吸收及产量, 为我国坡耕地施肥方式优化提供参考。

关键词: 非均匀施肥; 土壤水; 总氮总磷; 养分吸收; 玉米产量

中图分类号: S513; S158.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)06-0207-06

Effects of Nonuniform Fertilization on Nutrient Transport and Maize Growth in the Sloping Farmland

Xie Meixiang, Jin Qiu, Zhao Guangju, Geng Ren, Hong Dalin

(Rural Water Management Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: [Objective] The aims of this research are to investigate the effect of nonuniform fertilizer in slope foot of low fertilizer, middle fertilizer and slope top of high fertilizer on soil nutrient and maize growth, and to provide a basis for the scientific fertilization method in sloping farmland. [Methods] Field runoff plot and soil water collection were designed to observe nitrogen and phosphorus transport and nutrient absorption by corn. [Results] (1) Soil water content of slope foot was the highest and that of slope top had a fastest and largest decrease. (2) The nitrogen transported to shallow soil layer of slope foot, but phosphorus displayed peak value trends especially at the slope top. (3) A good nitrogen absorption in maize growth and dry material production were revealed under nonuniform fertilization, and nitrogen absorption rate at slope foot reached to 51.3%, and phosphorus absorption rate reached to 25.5%. [Conclusion] Nonuniform fertilization of decreasing total fertilizer amount ensures maize growth and yield, providing reference to optimize fertilization in sloping farmland of our country.

Keywords: nonuniform fertilization; soil water; total nitrogen and phosphorus; nutrient absorption; maize yield

坡耕地占据了我国耕地面积的 17.5%, 在当今耕地面积不断减少的背景下, 为坚守 18 亿亩耕地红线, 坡耕地为全国粮食生产起到了一定的保障作用。然而, 坡耕地独特的地形条件, 降雨冲刷及入渗作用引

起氮磷迁移^[1]产生了相应的农业面源污染^[2-3]。在农业耕作活动中为提高作物产量, 大量的化肥施用加剧了坡耕地的养分流失, 从而对临近水域造成了严重的水环境污染。以往的研究也表明施肥量与养分流失

收稿日期: 2023-11-30

修回日期: 2023-12-14

资助项目: 国家自然科学基金“坡耕地养分流失及其对非均匀施肥方式的响应研究”(42207105)

第一作者: 谢梅香(1992—), 女, 江苏丹阳人, 博士, 高级工程师, 主要从事农业污染物迁移及水土保持研究。E-mail: jsdyxm@163.com

http://stbcyj.paperonce.org

量成正比^[4-5],因此,亟待探究适宜坡耕地独特地形条件的减少施肥量的施肥措施,可以在保证坡耕地粮食产量和质量的前提下减轻坡耕地在农业活动中产生的面源污染问题。

坡耕地的施肥措施研究大多围绕不同施肥方式导致的养分流失结果开展,其中包括施肥时间^[6-7]、施肥量^[8]、耕作^[4]和肥料类型及配比等^[9]。杜映妮等^[10]以坡耕地为研究对象设置不同的施肥和耕作处理,结果表明横坡耕作和化肥有机肥配施能有效减少土壤氮流失。王剑等^[11]研究表明减施氮肥和行间配植结合能最有效地减少包茶园的氮磷流失。Ruffatti 等^[7]研究了氮肥施用时间和植被覆盖对农田地下排水中硝氮的流失作用,结果表明通过调整施肥时间能减少作物生长带来的硝氮流失但是施肥时间不影响作物的生长和养分吸收。何丙辉等^[9]研究表明在紫色土坡耕地中复合施用农家肥和化肥的处理下氮磷通过泥沙流失的系数最低。以上的研究以氮磷流失数量为研究对象,在描述氮磷迁移过程方面较为欠缺。

氮磷迁移是动态过程,氮磷流失是结果,氮磷迁移带来相应的流失^[12]。因此,建立氮磷迁移过程的变化规律与流失结果之间的相互关系对在坡耕地农业耕作中减少氮磷流失十分必要。同时在氮磷的迁移过程中探究作物生长和对氮磷吸收情况、对坡耕地施肥措施管理具有生产上的指导意义。

本研究以土壤中氮磷动态变化过程为主要研究对象,为适应坡耕地地形条件,旨在通过探究沿坡度方向非均匀施肥措施下的氮磷迁移规律及玉米生长对氮磷的吸收情况,为后期构建南方坡耕地氮磷迁移和流失的相互关系打下基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验于南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室滁州综合水文试验基地(32°17'N,118°12'E)开展。试验基地属亚热带季风气候区,雨热同季,降雨集中在夏季,年平均气温 14.9℃,年平均降雨量 1 060 mm,年蒸发量 924 mm,日照数 2 217 h,多年平均无霜期 217 d。当地坡耕地以玉米种植为主,土壤为潯育型黄泥土,耕层土壤为粉质壤土,土壤有机质 16.8 g/kg,全氮 0.5 g/kg,全磷 0.37 g/kg,全钾 16.56 g/kg,pH 值为 6.75,土壤容重 1.64 g/cm³。

1.2 试验设计

试验径流小区采用长 5 m,宽 2 m,高 0.7 m 铁皮(厚 0.3 cm)作为小区围挡,垂直嵌入土壤中 0.6 m 深,径流小区坡度为 8°,共设置径流小区 2 个,作为重

复对比。对土壤观测点进行钻孔埋设 FDR 土壤含水量监测探头(TEROS12)和陶瓷头土壤溶液采集器(PAV2000),每个小区共设置观测点 6 个,顺坡方向小区均匀分成坡上、坡中、坡下分别布置观测点,竖直方向在土层 30 cm 和 60 cm 深度处共布置 2 层,总共 6 个观测点布置在小区沿坡度方向的纵剖面上。

供试夏玉米品种为太玉 339,种植一季,顺坡方向均匀种植 12 株,横坡方向均匀种植 3 株,一个小区共均匀种植 36 株玉米作物,于 2021 年 5 月 25 日播种,9 月 7 日收获。玉米肥料施用史丹利复合肥(氮磷钾比例为 30:12:8),顺坡方向每 4 株划定坡上、坡中、坡下三处进行不同量级的基肥穴施,横坡方向保持一致。基肥非均匀穴施采用坡顶高肥、坡中中肥、坡脚低肥的非均匀施肥方式,其中,坡顶每个穴内施肥量 50 g(1.8×10^5 kg/km²),坡中穴施肥量 35 g(1.3×10^5 kg/km²),坡脚穴施肥量 20 g(7.0×10^4 kg/km²),拔节时期 7 月 15 日在玉米根部追肥一次,每穴位追肥量 40 g(1.4×10^5 kg/km²)。

1.3 试验数据采集与分析

土壤观测点含水量值通过数据采集器(ZL6)连续自动传输到电脑终端,土壤溶液经负压陶瓷头由真空泵和针管吸出全部土壤溶液装入 100 ml 容量的聚乙烯塑料瓶中并做好各个观测点的标记,从玉米出苗 2021 年 6 月 18 日开始抽取第一次土壤溶液,而后每隔 7 d 取样一次,样品从田间采集后转入化学分析实验室,于冰箱 4℃保存,24 h 内测定其总氮、总磷浓度。水质总氮采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法进行测定,水质总磷采用钼酸铵分光光度法进行测定。

玉米收获时,测定试验小区内坡脚、坡中和坡顶所有籽粒和根、茎、叶的总氮和总磷含量。按以下公式计算出肥料吸收率^[13]。

$$\text{氮肥吸收率} = (\text{籽粒产量} \times \text{籽粒 N 含量} + \text{根产量} \times \text{根 N 含量} + \text{茎产量} \times \text{茎 N 含量} + \text{叶产量} \times \text{叶 N 含量}) / \text{氮肥投入量} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{磷肥吸收率} = (\text{籽粒产量} \times \text{籽粒 P 含量} + \text{根产量} \times \text{根 P 含量} + \text{茎产量} \times \text{茎 P 含量} + \text{叶产量} \times \text{叶 P 含量}) / \text{磷肥投入量} \times 100\% \quad (2)$$

2 结果与分析

2.1 土壤水及氮磷运移特征

整体上土壤水分与降雨呈正相关(图 1),土壤水分均值沿坡度向下递增,即相同土层深度下坡脚处的土壤含水量最大,而坡顶处的土壤含水量最小。这主要与降

雨在坡面产流有关,坡面径流顺着坡面往下聚集导致坡脚处土壤含水量增高。其次,坡脚位置的水平高度相对较低,土壤水在重力作用下运移至坡脚处导致坡顶、坡中和坡脚的土壤水分依次递增。降雨导致土壤水分的上升,在玉米生长的前期只有坡顶处的土壤水分达到饱和状态,在玉米生长中后期降雨使得沿坡度方向土壤水分都达到饱和状态。在降雨后,土壤水分下降幅度由坡顶至坡脚处递减,即坡顶处土壤水分下降最快最多,这与土壤水顺坡度方向运移有关。由图1还可知,坡顶和坡脚处的土壤水分方差值较大,坡中的土壤水分方差值较小。这说明坡中的土壤水分含量值较稳定,而坡顶和坡脚处的土壤水分含量波动较大。

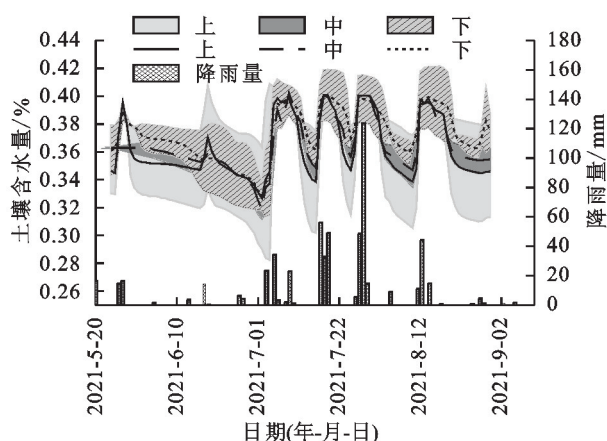


图1 降雨及沿坡度方向土壤水分情况

Fig. 1 Rainfall and soil water content condition

如图2所示,在整个玉米生长周期,坡脚的总氮含量最低,而坡中和坡顶的总氮含量处于较高水平。这是因为坡脚处的施肥量最小,坡中和坡顶的施肥量较高。土层坡脚处的总氮增长幅度也明显小于坡中和坡脚的总氮增长幅度。说明在整个玉米生长周期内顺坡非均匀施肥导致的土壤总氮迁移过程较为滞缓,只在由坡顶往坡中处明显发生迁移。

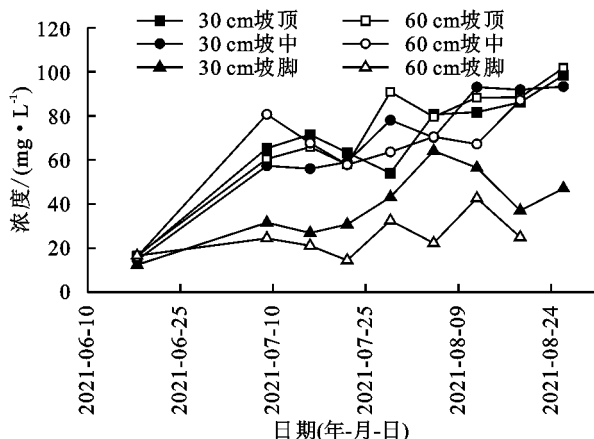


图2 壤中不同观测点总氮浓度的变化特征

Fig. 2 Total nitrogen transport characteristics of different subsurface observations

如图3所示,土壤水总磷含量呈现峰值的变化趋势,与总氮呈现不同的变化规律。在整个玉米生长周期内,浅层土壤水总磷浓度变化较为明显,且以坡顶和坡中的峰值变化为主。浅土层的土壤水总磷变化主要发生在玉米拔节期,而深土层的总磷含量峰值出现较浅土层滞后一周时间。总磷的第一次峰值出现在玉米播种后第一次土壤水峰值出现的时间(图1,3),说明初始的土壤水分增多溶解穴施的肥料使得土壤总磷浓度出现峰值,而因为顺坡度方向由坡顶至坡脚肥料施用减少,故总磷浓度的峰值也呈现出往坡脚递减的趋势。

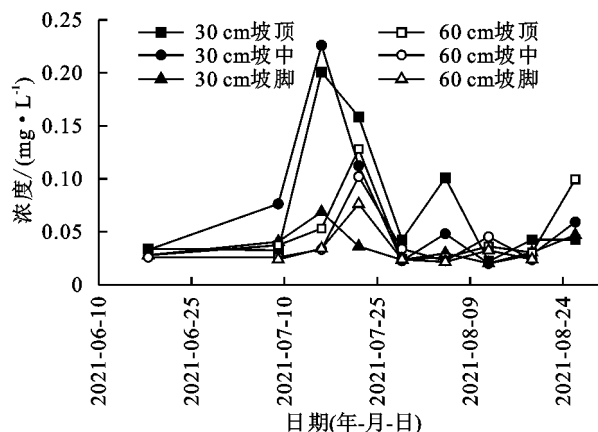


图3 壤中不同观测点总磷浓度的变化特征

Fig. 3 Total phosphorus transport characteristics of different subsurface observations

对比土壤水的运移和养分的迁移,可以明显看出土壤总氮受土壤水运移的影响较大,土壤总氮随着土壤水的运移而往坡脚迁移。在整个玉米生长周期内,这种迁移主要发生在30 cm的浅土层。而土壤总磷则受土壤水的运移影响和迁移过程不明显,因此总磷的分布与初始的施肥量呈正相关。总体上土壤水氮磷迁移不受追肥的影响,因为追肥在土壤表面,易受降雨冲刷通过地表径流而流失。

2.2 玉米氮磷含量特征

根据坡耕地不同位置处收获成熟玉米的总氮和总磷含量柱状图(图4,5)可知,玉米的养分主要呈现出从根部到叶片递减的趋势,其中总氮的变化不受坡度位置影响,而坡中和坡顶处根和茎总磷的差距明显减小。说明非均匀施肥并未影响玉米生长对氮元素的吸收,而磷元素因为不随土壤水迁移使得坡脚处的玉米植株对磷的吸收相对来说较差。与之相反的是,表1中所示的坡脚处玉米干物质总磷含量为3 171.7 mg/kg,明显大于坡中(2 397.8 mg/kg)和坡顶(2 586.6 mg/kg)处的总磷含量,且坡脚处的玉米干物质产量较高,说明顺坡度方向非均匀施肥并未抑制坡脚处的玉米产量。

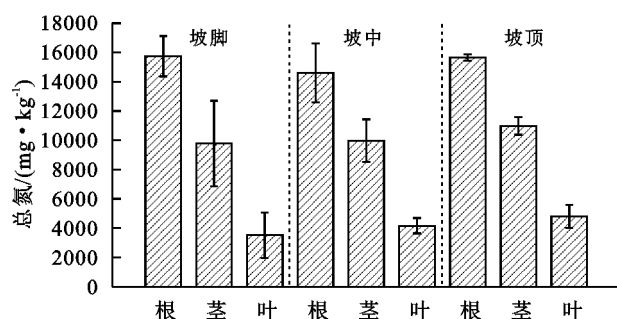


图 4 玉米植株不同部位的总氮含量

Fig. 4 Total nitrogen of different parts of the maize

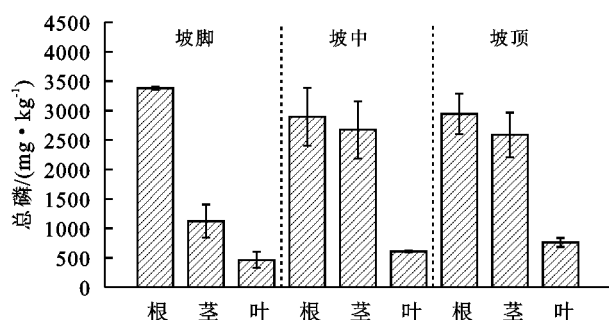


图 5 玉米植株不同部位的总磷含量

Fig. 5 Total phosphorus of different parts of the maize

表 1 沿坡度方向不同位置处玉米干物质产量和氮磷含量

Table 1 Maize yield and nitrogen and phosphorus content at different positions along the slope

位置	干物质 重量/g	籽粒产量/ (kg · hm ⁻²)	总氮含量/ (mg · kg ⁻¹)	总磷含量/ (mg · kg ⁻¹)
坡脚	351.0	1054	10497.7±1081.9	3171.74±257.8
坡中	536.2	1610	8664.7±2084.5	2397.83±472.1
坡顶	266.7	801	9541.1±2894.0	2586.57±462.7

表 2 中坡脚处的氮肥吸收率达到了 51.3%，而坡中和坡顶处则分别为 29.4%，11.2%，同样地，玉米对磷肥的吸收率由坡脚往坡顶也呈现出递减的趋势。由此可见坡脚低肥在保证产量的同时提高了玉米对养分的利用效率。坡脚肥料投入量低但是玉米对养分的吸收较好，相对而言，坡顶处的肥料投入量高且吸收量较少。这主要与养分在坡度方向的迁移有关，坡顶养分往坡脚处迁移使得坡顶部分肥料在坡中及坡脚处被玉米吸收利用。

表 2 沿坡度方向不同位置处的肥料吸收率

Table 2 Fertilizer utilization of the maize at different positions along the slope

位置	氮肥吸收率	磷肥吸收率
坡脚	51.3	25.5
坡中	29.4	17.5
坡顶	11.2	6.4

3 讨论

白美健等^[14]通过田间试验研究表明土壤硝态氮

分布与土壤水分和肥溶入土壤前在地表的分布状况密切相关。类似地，本次研究表明土壤水总氮与土壤水的运移规律较为一致，氮随水往坡脚处运移的特征较为明显。然而总磷分布则不受水分运移的影响，主要与施肥量相关。这与氮磷的化学性质有关，氮易溶于水，而磷则更多地吸附在土壤颗粒上^[15-17]。张凯^[18]通过小麦畦灌施肥试验发现非均匀施肥能减少肥料运移流失从而提高土壤水氮分布均匀性，而本次研究中非均匀施肥在整个玉米生长周期内的土壤水氮分布空间均匀性较差，土壤水氮分布主要还是受初始施肥的影响较大。非均匀穴施肥料对提高养分空间分布均匀性是一个长期过程，且受土壤水运移作用影响较大，而玉米的生长观测周期较短且旱地作物土壤水只受降雨影响，因此本研究中坡耕地非均匀穴施肥料对提高土壤养分空间均匀性效果不明显。

本次研究中玉米对肥料中氮和磷的利用效率也存在差异，磷的利用率仅是氮肥利用率的一半，但是符合玉米生长对养分的需求特征^[13]。陈云梅等^[19]研究表明化肥氮减量 20% 并配施有机肥能够提高玉米的干物质质量，类似地，本研究中坡中比坡顶减施肥料 30%，但是坡中的玉米干物质质量最高。坡脚、坡中和坡顶的肥料吸收率依次递减，这与肥料的投入量呈负相关^[20]，一方面是因为肥料通过壤中流淋失^[21]，另一方面大剂量的化肥施用减弱了玉米对养分的利用率。坡中肥料吸收率处于中等水平，但是玉米产量最高，而以往的研究^[22-23]表明相同的施肥措施下玉米产量都是从坡顶往坡脚逐渐增加，说明非均匀施肥通过改变坡面的养分分布使得作物产量发生变化。

坡耕地作为一种独特地形的特殊耕地类型，在考虑沿坡度方向非均匀施肥对土壤养分分布、转化和吸收的同时，更要关注非均匀施肥下水肥迁移引起的土壤养分再分布特征。以往研究表明相同施肥处理下土壤养分随着坡度自坡上往坡下逐渐增加^[22]，而本次研究针对以上养分迁移特点探讨通过坡脚低肥、坡中中肥和坡顶高肥的施肥方式减少坡耕地总施肥量，保障坡耕地作物对肥料利用的同时减少养分流失产生的面源污染。

4 结论

(1) 降雨在坡面入渗往坡脚处积聚使得坡脚土壤含水量明显大于坡顶的土壤含水量。坡顶处的土壤含水量在玉米生长前期最先达到饱和状态，而后降雨使得坡中和坡脚位置处土壤含水量呈饱和状态。

(2) 在玉米生长周期内土壤水氮往坡脚浅土层处迁移较为明显，因为磷吸附在土壤颗粒上导致水质

总磷呈现出峰值变化的趋势,且变化幅度由坡顶往坡脚处递减。

(3) 非均匀施肥未影响玉米生长过程中的氮素吸收,只是减少了坡脚处植株对磷的吸收。但总体来看顺坡度方向非均匀施肥并未对坡脚处的玉米产量产生不利影响。玉米对肥料的吸收率由坡脚往坡顶也呈现出递减的趋势,坡脚低肥在保证产量的同时提高了玉米对养分的利用效率。

(4) 通过减少坡耕地总施肥量的非均匀施肥方式能够在减少养分输入的条件下保障作物产量和养分吸收效率,说明考虑地形要素的非均匀施肥为优化坡耕地科学施肥提供了重要参考。

参考文献(References):

- [1] 裴志强,卢树昌,王茜,等.不同种植密度的夏季填闲作物对设施土壤磷素形态及其迁移性的影响[J].华北农学报,2020,35(2):126-132.
Pei Z Q, Lu S C, Wang X, et al. Effects of summer catch crops with different planting densities on greenhouse soil phosphorus forms and mobility [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2020,35(2):126-132.
- [2] Cremer C J M, Neuweiler I, Bechtold M, et al. Solute transport in heterogeneous soil with time-dependent boundary conditions[J]. *Vadose Zone Journal*, 2016,15(6):1-17.
- [3] Wei S, Chadwick D R, Amon B, et al. Comparison of nitrogen losses from different manure treatment and application management systems in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022,306:114430.
- [4] 王云,徐昌旭,汪怀建,等.施肥与耕作对红壤坡地养分流失的影响[J].农业环境科学学报,2011,30(3):500-507.
Wang Y, Xu C X, Wang H J, et al. Effect of fertilizer levels and tillage methods on nutrient loss of red soil slopes[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011,30(3):500-507.
- [5] Xie M X, Šimůnek J, Zhang Z Y, et al. Nitrate subsurface transport and losses in response to its initial distributions in sloped soils: An experimental and modelling study[J]. *Hydrological Processes*, 2019,33(26):3282-3296.
- [6] 卡着才让,德科加,徐成体.不同施肥时间及施氮水平对高寒草甸生物量和土壤养分的影响[J].草地学报,2015,23(4):726-732.
Ka Z C, De K J, Xu C T. The effects of different fertilizer times and nitrogen levels on biomass and soil nutrients in alpine meadow[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2015,23(4):726-732.
- [7] Ruffatti M D, Roth R T, Lacey C G, et al. Impacts of nitrogen application timing and cover crop inclusion on subsurface drainage water quality [J]. *Agricultural Water Management*, 2019,211:81-88.
- [8] 林超文,庞良玉,罗春燕,等.平衡施肥及雨强对紫色土养分流失的影响[J].生态学报,2009,29(10):5552-5560.
Lin C W, Pang L Y, Luo C Y, et al. Effect of balanced fertilization and rain intensity on nutrient losses from a purple soil in Sichuan[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009,29(10):5552-5560.
- [9] 何丙辉,郭甜,姚军,等.紫色土坡耕地不同施肥水平下泥沙中氮、磷流失特征[J].西南大学学报:自然科学版,2012,34(7):1-8.
He B H, Guo T, Yao J, et al. Characteristics of N and P losses in sediment of purple soil on sloping farmland with different fertilization levels[J]. *Journal of Southwest University: Natural Science Edition*, 2012,34(7):1-8.
- [10] 杜映妮,李天阳,何丙辉.不同施肥和耕作处理紫色土坡耕地碳、氮、磷流失特征[J].植物营养与肥料学报,2021,27(12):2149-2159.
Du Y N, Li T Y, He B H. Characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus loss in sloping farmland of purple soil under different fertilization and cultivation methods[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021,27(12):2149-2159.
- [11] 王剑,王肖君,斯圆丽,等.平衡减量施肥和行间配植对白茶园氮磷流失的影响[J].水土保持学报,2021,35(3):69-76.
Wang J, Wang X J, Si Y L, et al. Effects of balanced reduced fertilization and inter-row planting on nitrogen and phosphorus loss in white tea garden[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021,35(3):69-76.
- [12] 谢梅香,洪大林,付静,等.单次和间歇性降雨下紫色土坡地壤中硝氮迁移特征[J].水土保持学报,2022,36(1):24-29.
Xie M X, Hong D L, Fu J, et al. Characteristics of nitrate nitrogen transport of purple sloped soils in response to single and intermittent rainfalls[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022,36(1):24-29.
- [13] 唐妥,胡国丽,梁露.不同施肥处理对玉米生长及养分利用率的影响[J].耕作与栽培,2023,43(4):93-95,98.
Tang T, Hu G L, Liang L. Effects of different fertilization treatments on corn growth and nutrient utilization efficiency [J]. *Tillage and Cultivation*, 2023,43(4):93-95,98.
- [14] 白美健,许迪,李益农.冬小麦表施尿素畦灌下土壤水氮分布试验研究[J].水利学报,2010,41(10):1254-1260.
Bai M J, Xu D, Li Y N. Experimental study on spatial distribution of soil water and inorganic nitrogen under border irrigation after scattering urea [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010,41(10):1254-1260.
- [15] 宁川川,王建武,蔡昆争.有机肥对土壤肥力和土壤环境质量的影响研究进展[J].生态环境学报,2016,25(1):175-181.

- Ning C C, Wang J W, Cai K Z. The effects of organic fertilizers on soil fertility and soil environmental quality: A review[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(1):175-181.
- [16] 许峰,蔡强国,吴淑安,等.三峡库区坡地生态工程控制土壤养分流失研究:以等高植物篱为例[J].地理研究, 2000,19(3):303-310.
- Xu F, Cai Q G, Wu S A, et al. A study on soil nutrient loss control by slope eco-engineering in the Three Gorges Reservoir Region: Taking the contour hedgerows as an example[J]. Geographical Research, 2000,19(3):303-310.
- [17] 焦平金,许迪,王少丽,等.自然降雨条件下农田地表产流及氮磷流失规律研究[J].农业环境科学学报,2010, 29(3):534-540.
- Jiao P J, Xu D, Wang S L, et al. Nitrogen and phosphorus runoff losses from farmland under nature rainfall[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010,29(3):534-540.
- [18] 张凯.畦灌均匀与非均匀撒施条件下水肥时空分布试验研究[D].郑州:华北水利水电大学,2016.
- Zhang K. Experimental Study on Water and Fertilizer Distribution of Irrigation Uniform and Non-uniform Application Conditions[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2016.
- [19] 陈云梅,赵欢,肖厚军,等.化肥氮减量配施生物炭和菜籽饼对玉米-白菜养分吸收、氮素利用及产量的影响[J].中国土壤与肥料,2022(6):115-122.
- Chen Y M, Zhao H, Xiao H J, et al. Effects of chemical fertilizer nitrogen reduction combined with biochar and rapeseed cake on nutrient absorption, nitrogen utilization, and yield of maize-cabbage[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2022(6):115-122.
- [20] 郭丽,王广恩,李义红,等.施氮对土壤养分特征及夏玉米养分吸收利用的影响[J].华北农学报,2023,38(3): 121-129.
- Guo L, Wang G E, Li Y H, et al. Effect of nitrogen on nutrient distribution in soil and nutrient accumulation and utilization in summer maize[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2023,38(3):121-129.
- [21] Behera S K, Panda R K. Effect of fertilization on crop responses and solute transport for rice crop in a sub-humid and sub-tropical region[J]. Paddy and Water Environment, 2013,11(1/4):227-239.
- [22] 雷金银,雷晓婷,周丽娜,等.耕作措施对缓坡耕地土壤养分分布及肥料利用率的影响[J].农业工程学报, 2020,36(18):127-134.
- Lei J Y, Lei X T, Zhou L N, et al. Effects of tillage measures on soil nutrients distribution and fertilizer use efficiency on gentle slope farmland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(18):127-134.
- [23] 赵京考,纪德智,王端,等.黑土区坡耕地坡位与施肥对春玉米产量的影响[J].东北农业大学学报,2014,45(5):8-12.
- Zhao J K, Ji D Z, Wang D, et al. Effect of slope positions and fertilization on the corn yield in undulating regions of black soil[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2014,45(5):8-12

(上接第206页)

- [22] Gou Q P, Zhu Q K. Response of deep soil moisture to different vegetation types in the Loess Plateau of northern Shannxi, China[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1):15098.
- [23] 曲卫东,陈云明,王琳琳,等.黄土丘陵区柠条人工林土壤有机碳动态及其影响因子[J].中国水土保持科学, 2011,9(4):72-77.
- Qu W D, Chen Y M, Wang L L, et al. Dynamics of soil organic carbon in *Caragana microphylla* forest and its relationship with environment factors in Loess Hilly Region[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2011,9(4):72-77.
- [24] Deng L, Yan W M, Zhang Y W, et al. Severe depletion of soil moisture following land-use changes for ecological restoration: Evidence from Northern China[J]. Forest Ecology and Management, 2016,366:1-10.
- [25] Védère C, Lebrun M, Honvault N, et al. How does soil water status influence the fate of soil organic matter: A review of processes across scales[J]. Earth-Science Reviews, 2022,234:104214.
- [26] Dijkstra F A, Zhu B, Cheng W X. Root effects on soil organic carbon: A double-edged sword[J]. The New Phytologist, 2021,230(1):60-65.
- [27] Zhao F B, Wu Y P, Hui J Y, et al. Projected soil organic carbon loss in response to climate warming and soil water content in a loess watershed[J]. Carbon Balance and Management, 2021,16(1):24.
- [28] McCormack M L, Dickie I A, Eissenstat D M, et al. Redefining fine roots improves understanding of below-ground contributions to terrestrial biosphere processes[J]. New Phytologist, 2015,207(3):505-518.