



施氮量对黄土高原旱地冬小麦产量和水分利用效率影响的整合分析

马登科^{1,2}, 殷俐娜^{1,3}, 刘溢健³, 杨文稼³, 邓西平^{1,3}, 王仕稳^{1,3}

(¹中国科学院水利部水土保持研究所/黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100; ²中国科学院大学, 北京 100049; ³西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要:【目的】明确氮肥在黄土高原地区不同种植条件下对冬小麦生产的影响及各条件下合理的施氮量。【方法】通过文献检索共获得 82 篇大田试验文献, 包含 355 个独立研究的 1 169 组观测数据, 采用整合分析比较氮肥在黄土高原不同区域、不同年均温、不同年降水量及不同耕层有机质含量下对冬小麦产量和水分利用效率的影响, 并采用回归分析探究各分组产量和水分利用效率与施氮量间的关系。【结果】施氮整体上显著提高了黄土高原冬小麦产量和水分利用效率, 相对增长率分别为 66.09% 和 72.38% ($P < 0.05$)。施氮后西北部产量相对增长率(69.27%) 高于东南部, 水分利用效率增长率(65.53%) 低于东南部; 西北部在施氮量 212 kg·hm⁻² 时产量达到最高, 东南部需多施 15 kg·hm⁻² 才能获得最高产量; 西北部施氮 232 kg·hm⁻² 时水分利用效率最高, 而东南部水分利用效率在施氮 224 kg·hm⁻² 时基本趋于稳定。施氮后年均温 ≤ 10℃ 地区产量和水分利用效率的相对增长率(79.12%, 75.00%) 均高于 > 10℃ 地区; 年均温 > 10℃ 地区施氮 189 kg·hm⁻² 和 187 kg·hm⁻² 时产量和水分利用效率分别达到最高, 而年均温 ≤ 10℃ 地区施氮 225 kg·hm⁻² 时产量才趋于最大, 水分利用效率在施氮 239 kg·hm⁻² 时达到最高。施氮后在年均降水 ≤ 600 mm 地区产量相对增长率(70.48%) 更显著, 而水分利用效率则在年均降水 > 600 mm 时更显著; 年均降水 ≤ 600 mm 地区在施氮量 235 kg·hm⁻² 和 244 kg·hm⁻² 时, 产量和水分利用效率分别达到最高, 年均降水 > 600 mm 地区实现高产的施氮量为 250 kg·hm⁻²。施氮后耕层有机质含量 ≤ 12 g·kg⁻¹ 条件下, 产量和水分利用效率的相对增长率(78.24%, 86.55%) 均高于 > 12 g·kg⁻¹ 条件, 前者在施氮量 226 kg·hm⁻² 和 212 kg·hm⁻² 时产量和水分利用效率分别达到最高, 而后者获得最高产量和最高水分利用效率的施氮量分别为 163 kg·hm⁻² 和 175 kg·hm⁻²。【结论】在黄土高原, 冬小麦在东南部和西北部获得高产的合理施氮量分别为 227 kg·hm⁻² 和 212 kg·hm⁻²; 年均温 > 10℃ 地区合理施氮量为 187 kg·hm⁻², 年均温 ≤ 10℃ 地区为 239 kg·hm⁻²; 年均降水 > 600 mm 地区合理施氮量为 250 kg·hm⁻², 年均降水量 ≤ 600 mm 地区为 235 kg·hm⁻²; 耕层有机质含量 ≤ 12 g·kg⁻¹ 条件下的合理施氮量为 226 kg·hm⁻², 高于 12 g·kg⁻¹ 时则为 163 kg·hm⁻²。

关键词: 氮肥; 冬小麦; 产量; 水分利用效率; 整合分析

A Meta-Analysis of the Effects of Nitrogen Application Rates on Yield and Water Use Efficiency of Winter Wheat in Dryland of Loess Plateau

MA DengKe^{1,2}, YIN LiNa^{1,3}, LIU YiJian³, YANG WenJia³, DENG XiPing^{1,3}, WANG ShiWen^{1,3}

(¹Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources/State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling 712100, Shaanxi; ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; ³Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi)

收稿日期: 2019-05-15; 接受日期: 2019-07-03

基金项目: “十二五”农村领域国家科技计划(2015BAD22B01)、国家重点基础研究计划(2015CB150402)

联系方式: 马登科, E-mail: dengkema19@163.com. 通信作者王仕稳, E-mail: shiwenwang@nwsuaf.edu.cn

Abstract: 【Objective】 The objective of this study was to clarify the effects of nitrogen fertilizer (N) on winter wheat yield and the optimum N level under different planting conditions in the Loess Plateau. **【Method】** A total of 82 field studies were obtained through literature retrieval. The effects of N on yield and water use efficiency of winter wheat in different regions, annual mean temperature, annual precipitation and plough layer organic matter content in the Loess Plateau were compared by meta-analysis. Regression analysis was used to explore the relationship between yield and N application rate, water use efficiency and N application rate in each group. **【Result】** Compared with no N application, N application improved the yield and water use efficiency of winter wheat in the Loess Plateau by 66.09% and 72.38%, respectively ($P < 0.05$). The effect of N on yield was more prominent in the northwest than that in the southeast, and the effect of N on water use efficiency was more prominent in the southeast than in northwest. The yield of northwest reached the highest when the N application rate was $212 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, and the highest yield could be obtained by applying another $15 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ in southeast. The water use efficiency reached maximum at $232 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ in northwest, while at $224 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ in southeast. The effects of N on yield and water use efficiency of winter wheat were more prominent in areas with average annual temperature $\leq 10^\circ\text{C}$. At the area of average temperature $> 10^\circ\text{C}$, yield and water use efficiency reached the maximum when N rates were $189 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ and $187 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, respectively. However, at the area of average temperature $\leq 10^\circ\text{C}$, yield and water use efficiency reached the maximum when N rates were $225 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ and $239 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, respectively. The effect of N on yield was prominent in areas of annual average precipitation $\leq 600 \text{ mm}$, while the change rate of water use efficiency was prominent in areas with annual precipitation $> 600 \text{ mm}$. The yield and water use efficiency reached the highest at $235 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ and $244 \text{ kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ application rates in areas with annual precipitation $< 600 \text{ mm}$, while $235 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ and $250 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ in the area with annual precipitation $> 600 \text{ mm}$. The effect of N on yield and water use efficiency was prominent when the organic matter content in plough layer was $\leq 12 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$. Under the condition of topsoil organic matter $> 12 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, the yield and water use efficiency tended to be highest when the N application rates were $163 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ and $175 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$. The optimum N application rate was $226 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ when the topsoil organic matter content $\leq 12 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$. **【Conclusion】** The optimum N application rates for high yield of winter wheat in the southeast and northwest were $227 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ and $212 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, respectively. The optimum N application rate was $188 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ in the area with average annual temperature $> 10^\circ\text{C}$, and $225 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ when average annual temperature $\leq 10^\circ\text{C}$. In the area with annual average precipitation $> 600 \text{ mm}$, the optimum N application rate was $250 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, and $235 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ when annual average precipitation $\leq 600 \text{ mm}$. The optimum N application rate was $226 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ under the topsoil organic matter content $\leq 12 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, and $163 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ when the topsoil organic matter content $> 12 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Key words: nitrogen fertilizer; winter wheat; yield; water use efficiency; meta-analysis

0 引言

【研究意义】 氮素是作物生产中最主要的限制因子之一, 施用氮肥是提高作物产量和水分利用效率的重要措施^[1]。氮肥的肥效受气候环境、土壤特性、作物种类及施氮方式等多个因素的影响^[2-3]。科学合理的施氮除了有效促进作物的生长, 提高作物产量和水分利用效率外, 还可以减少氮肥的损耗及减轻对生态环境的负面影响, 从而实现农业的可持续生产。黄土高原是我国重要的旱作农业区, 小麦是该地区播种面积最大的粮食作物, 氮肥的大量施用一直是维持该地区小麦产量的主要措施^[4]。但由于该区土壤相对贫瘠, 加之小麦生育期降水偏少等一系列因素, 以及不合理的施氮量, 使得土壤氮素供应能力与小麦生长需求间的矛盾在部分地区仍然较为突出^[5-6]。因此, 探究黄土高原地区不同气候和土壤特性等条件下氮肥效应与冬小麦产量和水分利用效率之间的关系, 对指导该地区

冬小麦生产中氮肥的合理施用具有积极意义。**【前人研究进展】** 关于氮肥用量对黄土高原地区旱地冬小麦产量和水分利用的影响, 前人在不同区域做了大量研究。例如, 张亮^[7]在陕西周至县的研究中发现, 施氮量 $263 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 冬小麦产量和水分利用效率均达到最高, 相对增长率分别为 79.23%和 86.38%。而杨君林等^[8]在甘肃镇原县的研究结果表明, 冬小麦产量和水分利用效率在施氮量 $200 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时均达到最高, 相对增长率分别为 138.43%和 250.83%。张昊青^[9]在年降水 578 mm 的白水通过 3 年的试验发现, 单施化肥条件下施氮 $225 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时产量最高, 相对不施氮产量增加了 19.03%。而 ZHONG 等^[10]的研究表明, 在年降水量 632 mm 的陕西杨凌区, 施氮量小于 $360 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 小麦产量随施氮量的增加而增加, 但各施氮处理下产量差异不显著。WANG 等^[11]在陕西长武县通过 4 年的定位试验发现, 在施氮量 $180 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时, 干旱年份产量相对增长率为 14.00%, 而湿润年份

为 32.80%，干旱年份施氮对小麦水分利用效率没有显著影响，湿润年份则影响显著。栗丽等^[12]的研究表明，在生育期灌水与不灌水条件下，冬小麦产量均在施氮量 210 kg·hm⁻² 时达到最高，在不灌水条件下，小麦水分利用效率在施氮量 150 kg·hm⁻² 时达到最高，相对增长率达 14.34%，而在灌水条件下施氮量 210 kg·hm⁻² 时水分利用效率最高。【本研究切入点】前人研究结果表明，由于试验地点气候环境和土壤理化性质等存在差异，在不同的区域最大产量和水分利用效率所对应的氮肥用量并不相同。如何使得各点的研究数据能够在区域尺度上指导合理施肥，就有必要对已有的独立研究进行整合分析，在大样本的基础上探究黄土高原不同地区合理的施氮水平。【拟解决的关键问题】本研究通过文献检索获得了 82 篇文献共 1 169 组观测的试验数据，运用整合分析 (Meta-analysis) 的方法，分析不同氮肥用量在黄土高原地区不同区域、不同年均温、不同年降水量及不同耕层有机质含量下对冬小麦产量和水分利用效率

的影响，并找出不同环境条件下最佳的氮肥用量，为该地区冬小麦生产中氮肥的合理施用提供科学指导。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究所用数据来源于 Web of Science 和中国知网 (CNKI)，文献检索所用的关键词主要包括氮 (nitrogen)、施氮 (N application)、冬小麦 (winter wheat)、产量 (yield)、水分利用效率 (water use efficiency)。所选用的文献必须满足以下标准：(1) 试验地点属于黄土高原地区，试验材料为冬小麦；(2) 试验为大田试验，冬小麦全生育期不进行灌溉；(3) 试验必须包含相同条件下的对照和施氮处理，文献报道中至少包含产量和水分利用效率中的一项；(4) 施氮处理中必须有明确的施氮量；(5) 文献报道中应包括试验组和对照组的平均值。对文献中用图表形式报道的数据进行数字化，最后建立了 1 个共 82 篇文献、355 个独立研究的数据集。各试验地点分布如图 1 所示。

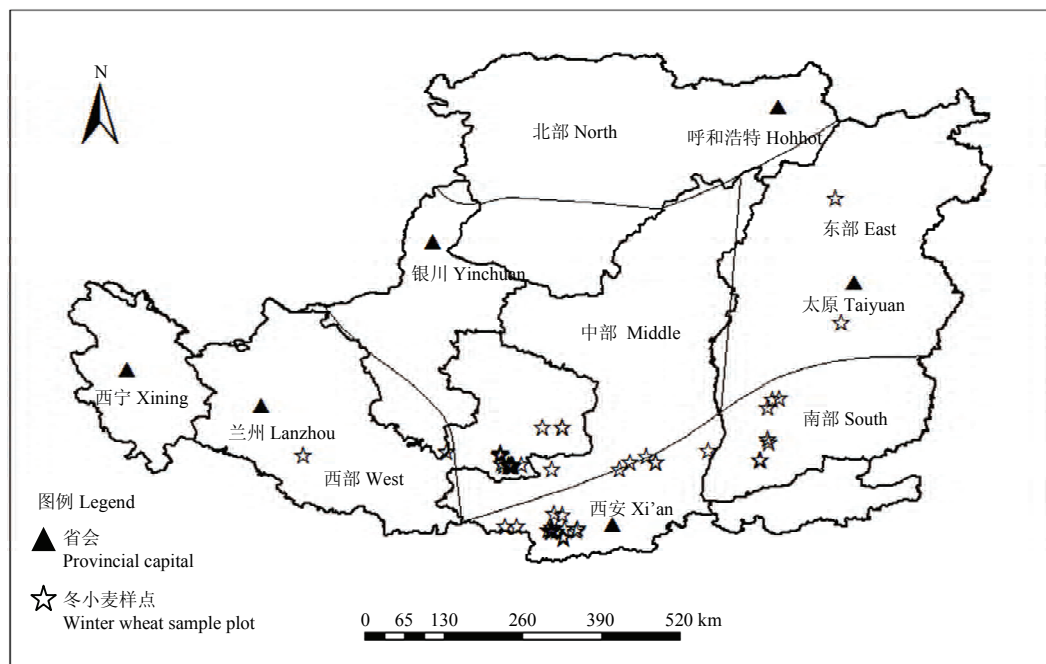


图 1 冬小麦试验地点分布图

Fig. 1 Distribution map of winter wheat experimental sites in Loess Plateau

1.2 数据分类

为探究氮肥在黄土高原不同区域及气候环境等条件下对冬小麦产量和水分利用效率的影响情况，根据

所获得的数据分布，按区域、年均温、年降水量及耕层土壤有机质含量等对数据进行分类，各分组的样本量如表 1 所示。

根据黄土高原气候特征及本课题组前期研究中对黄土高原的分区方法, 本研究将黄土高原分为东部、西部、南部、北部和中部, 并根据所得试验地点的分布及冬小麦在黄土高原的种植区域, 将东部和南部合为东南部, 其余区域均为西北部^[13-17] (图 1)。根据各试验地

点年均温分布情况, 以 10℃为年均温分界点。由于本研究中各独立试验地点年降水量大部分高于 500 mm, 因此以 600 mm 为分界点对年降水进行划分。耕层土壤有机质含量是影响施氮效应的重要因素, 根据数据分布情况以 12 g·kg⁻¹ 为耕层有机质含量分界点。

表 1 氮肥对冬小麦产量和水分利用效率效应数据库配对试验组数/观测数分布

Table 1 Paired experimental group number/observation number distribution of effects of nitrogen fertilizer on winter wheat yield and water use efficiency

	分区 DA		年均温 AVT (°C)		年均降水 AP (mm)		耕层有机质 TOM (g·kg ⁻¹)	
	西北 NW	东南 SE	≤10	>10	≤600	>600	≤12	>12
产量 Y	204/368	151/385	172/284	183/469	284/570	71/183	175/293	138/345
水分利用效率 WUE	155/291	53/125	140/234	68/182	167/339	41/77	125/199	73/157

DA: 分区 Distribution area; AVT: 年均温 Annual average temperature; AP: 年均降水 Annual precipitation; TOM: 耕层有机质 Topsoil organic matter; NW: 西北 Northwest; SE: 东南 Southeast; Y: 产量 Yield; WUE: 水分利用效率 Water use efficiency

1.3 数据分析方法

本研究采用反应比 (response ratio, R) 作为效应量来刻画施氮对冬小麦产量及水分利用效率的影响^[18-19], 其公式如下:

$$\ln R = \ln (X_e / X_c) = \ln (X_e) - \ln (X_c) \quad (1)$$

式中, X_e 和 X_c 分别为独立研究中试验组和对照组的平均值。上述反应比再转化为百分比变化率^[19], 其公式如下:

$$Y = (e^{\ln R} - 1) \times 100\% \quad (2)$$

式中, 正的 Y 值表示施氮产生了正效应, 负的 Y 值则表示施氮产生了负效应。

如果 Y 值的 95% 置信区间与 0 重叠, 则认为施氮的效应不显著, 反之则效应显著^[18]。在各亚组分析中, 如果不同分组内各 Y 值的 95% 置信区间没有重叠, 则认为组间差异显著, 反之则组间差异不显著^[20]。为进一步探究施氮量与不同分组下的冬小麦产量和水分利用效率间的关系, 笔者对施氮量和产量、施氮量和水分利用效率进行了回归分析。

本研究利用 MetaWin 2.1^[21] 进行整合分析, 用 Spass16.0、Excel 2007 和 SigmaPlot 13.0 进行回归分析及绘图。

2 结果

2.1 不同区域施氮对冬小麦产量和水分利用效率的影响

在黄土高原地区, 相对于不施氮肥, 施氮平均使冬小麦产量增加了 66.09% (n=753) (图 2-A-a)。不施氮时冬小麦平均产量为 2 887 kg·hm⁻², 施氮后产量

达 4 431 kg·hm⁻² (图 3-A)。在不同的分布区, 氮肥对冬小麦产量的效应存在差异, 在西北部施氮后冬小麦产量的相对增长率为 69.27% (n=368), 东南部为 63.05% (n=385) (图 2-A-b), 但东南部冬小麦产量在相同的施肥条件下均高于西北部 (P<0.05) (图 3-A)。在西北部, 当施氮量为 212 kg·hm⁻² 时, 冬小麦产量达 4 175 kg·hm⁻², 随后产量趋于稳定 (图 4-A)。在东南部, 产量随施氮量的增加先升后降, 在施氮量 227 kg·hm⁻² 时达到最高 (5 949 kg·hm⁻²) (图 4-C)。

不施氮肥条件下, 黄土高原冬小麦平均水分利用效率为 7.56 kg·hm⁻²·mm⁻¹, 施氮后可达 11.82 kg·hm⁻²·mm⁻¹ (图 3-B)。与不施氮肥相比, 施氮显著提高了冬小麦水分利用效率, 整体上相对变化率为 74.38% (n=416) (图 2-B-a), 其中东南部为 88.26%, 西北部为 65.53% (图 2-B-b)。在施氮条件下, 东南部小麦整体平均水分利用效率为 15.28 kg·hm⁻²·mm⁻¹, 西北部为 10.34 kg·hm⁻²·mm⁻¹, 东南部高于西北部 (P<0.05) (图 3-B)。无论是东南部还是西北部, 随施氮量的增加水分利用效率均先升后降, 东南部在施氮量 224 kg·hm⁻² 时达最高 (18.43 kg·hm⁻²·mm⁻¹), 而西北部在施氮量 232 kg·hm⁻² 时达最高 (12.21 kg·hm⁻²·mm⁻¹) (图 4-B, 4-D)。

2.2 不同年均温下施氮对冬小麦产量和水分利用效率的影响

在黄土高原地区, 不同的年均温下氮肥对冬小麦产量的影响不同, 在年均温 ≤10℃ 的地区施氮使产量增加了 79.12% (n=284), 高于年均温 >10℃ 地区 (图

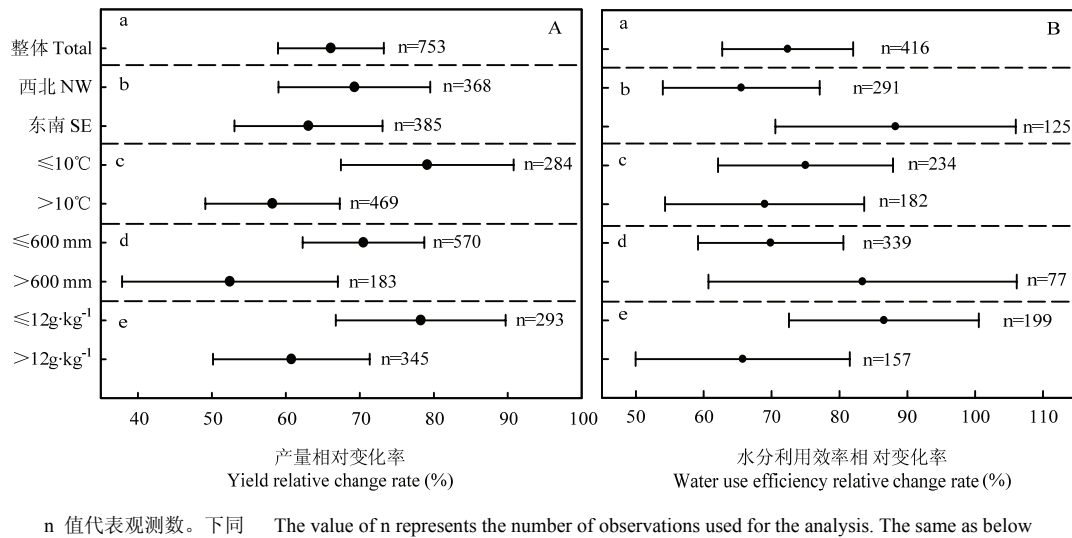


图 2 氮肥在不同区域 (b)、不同年均温 (c)、不同降水量 (d) 及不同耕层有机质含量 (e) 下对冬小麦产量 (A) 和水分利用效率 (B) 的影响
 Fig. 2 Effect of nitrogen application on winter wheat yield (A) and water use efficiency (B) under different regions (b), different annual average temperature (c), different precipitation (d) and different topsoil organic matter content (e)

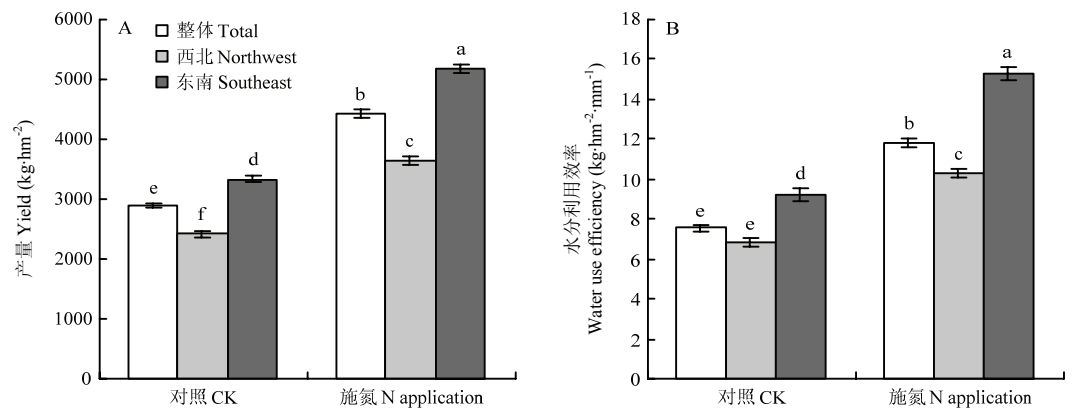


图 3 不同区域施氮对冬小麦产量 (A) 和水分利用效率 (B) 的影响

Fig. 3 Effect of nitrogen application on yield (A) and water use efficiency (B) of winter wheat in different regions

2-A-c)。在年均温>10°C地区, 施氮后冬小麦平均产量为 5 062 kg·hm⁻², 而年均温≤10°C地区平均产量为 3 390 kg·hm⁻² (图 5-A)。在年均温≤10°C地区和>10°C地区, 产量均随施氮量的增加先增加后保持稳定, 年均温≤10°C地区在施氮量 225 kg·hm⁻²时产量基本达到稳定水平 (4 110 kg·hm⁻²), 而年均温>10°C地区在施氮量 189 kg·hm⁻²时产量基本达到稳定 (5 545 kg·hm⁻²) (图 6-A, 图 6-C)。

在黄土高原地区, 不同的年均温下氮肥对冬小麦水分利用效率的影响不同, 在年均温≤10°C地区施氮

使水分利用效率增加了 75.00% (n=234), 略高于年均温>10°C地区的 68.98% (n=182) (图 2-B-c)。在年均温>10°C地区, 施氮后冬小麦水分利用效率可达 14.49 kg·hm⁻²·mm⁻¹, 而年均温≤10°C地区为 9.86 kg·hm⁻²·mm⁻¹, 前者高于后者 (P<0.05) (图 5-B)。在年均温≤10°C地区, 水分利用效率随施氮量的增加先增加后保持稳定, 施氮量 239 kg·hm⁻²时基本达到稳定, 为 12.17 kg·hm⁻²·mm⁻¹ (图 6-B); 在年均温>10°C地区, 水分利用效率随施氮量的增加先升后降, 施氮量 187 kg·hm⁻²时达最高 (16.26 kg·hm⁻²·mm⁻¹) (图 6-D)。

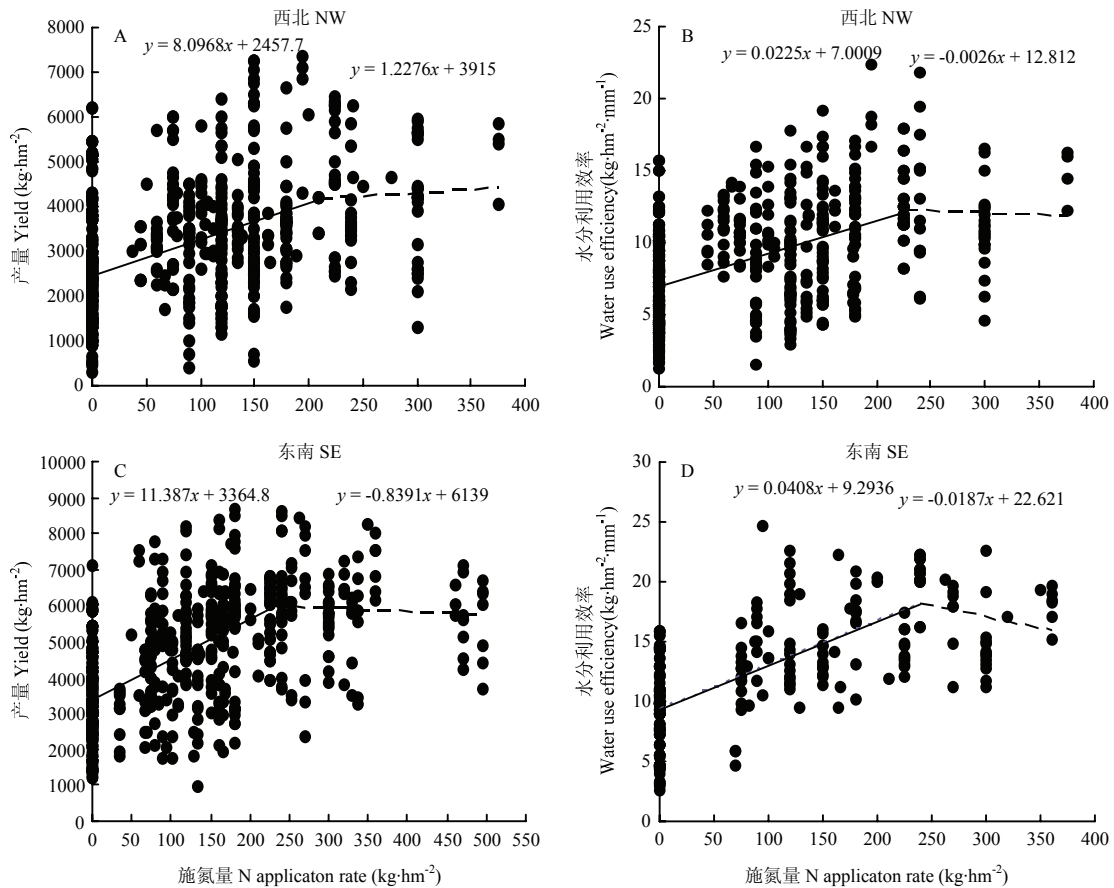


图 4 不同区域施氮量与冬小麦产量及水分利用效率的关系

Fig. 4 The relationship between nitrogen rates and winter wheat yield and water use efficiency in different regions

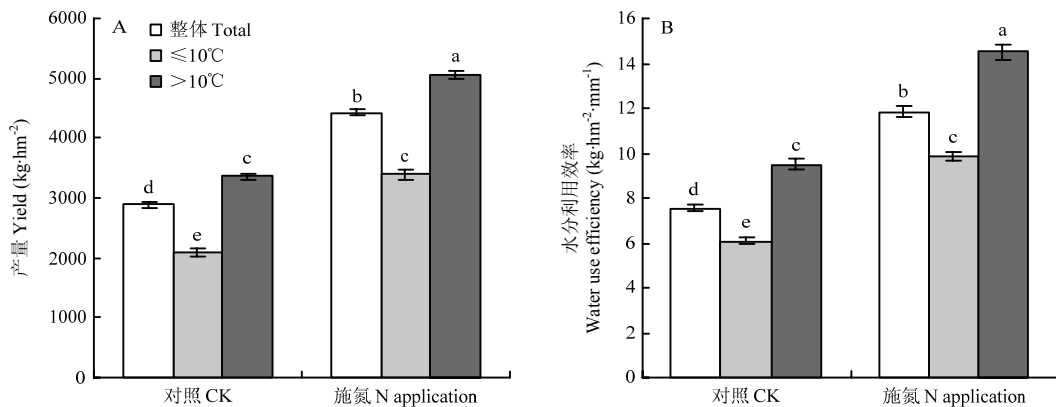


图 5 不同年均温下施氮对冬小麦产量 (A) 和水分利用效率 (B) 的影响

Fig. 5 Effect of nitrogen application on yield (A) and water use efficiency (B) of winter wheat under different annual temperature

2.3 不同年降水量下施氮对冬小麦产量和水分利用效率的影响

在黄土高原地区，不同的年降水量下氮肥对冬小

麦产量的影响不同，在年均降水量≤600 mm 的地区，施氮使冬小麦产量整体增加了 70.48% (n=570)，高于年均降水量>600 mm 地区 52.44%的增幅 (n=183)

(图 2-A-d)。在年均降水量>600 mm 地区, 施氮后冬小麦产量整体上可达 5 215 kg·hm⁻², 而在年均降水量≤600 mm 地区为 4 180 kg·hm⁻², 两者之间差异

显著 ($P<0.05$) (图 7-A)。在年均降水量≤600 mm 地区, 施氮量 235 kg·hm⁻²时产量基本达到稳定水平, 为 4 932 kg·hm⁻² (图 8-A); 在年均降水量>600 mm

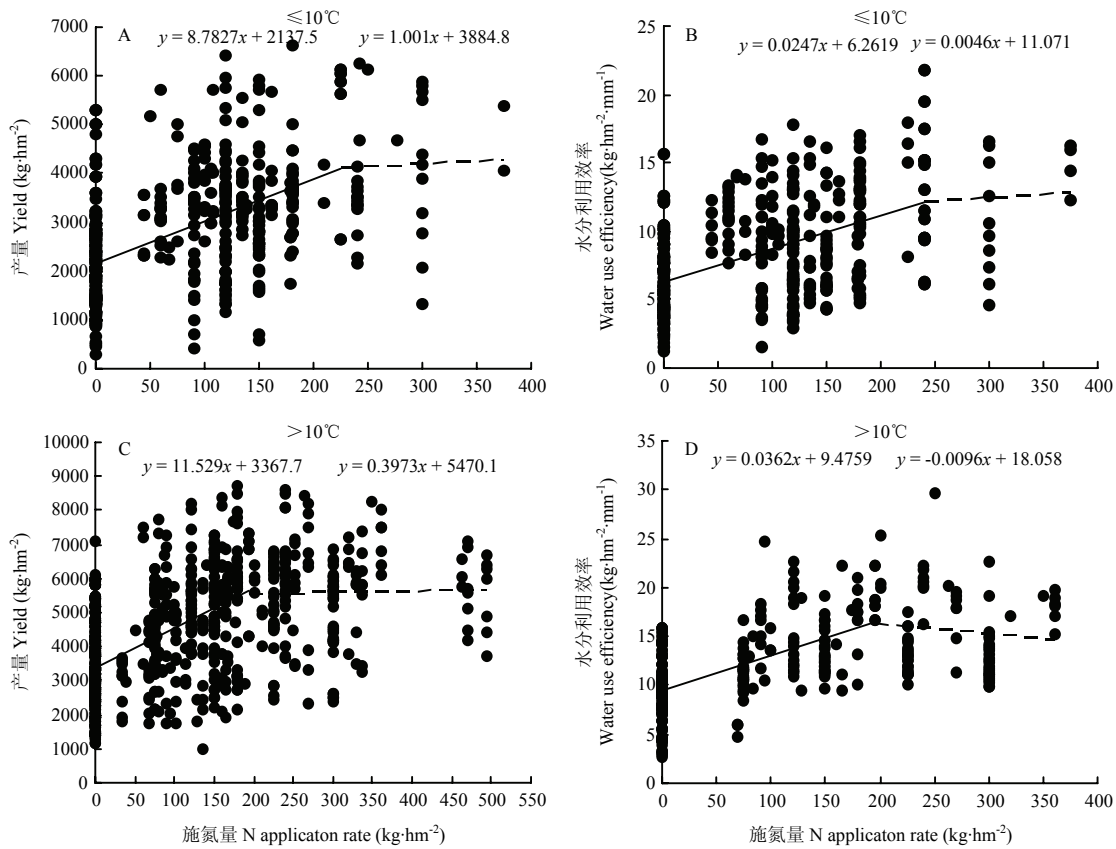


图 6 不同年均温下施氮量与冬小麦产量及水分利用效率的关系

Fig. 6 The relationship between nitrogen rates and winter wheat yield and water use efficiency in different annual average temperature

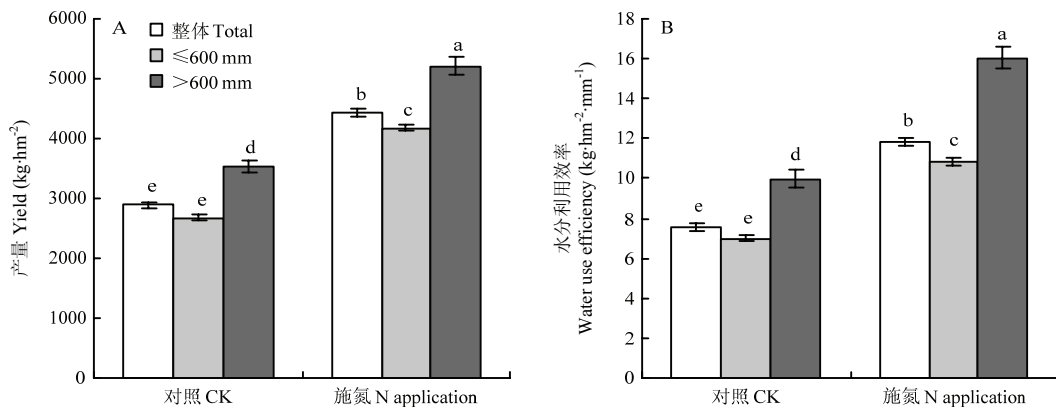


图 7 不同年均降水下施氮对冬小麦产量 (A) 和水分利用效率 (B) 的影响

Fig. 7 Effect of nitrogen application on yield (A) and water use efficiency (B) of winter wheat under different annual precipitation

地区, 产量随施氮量的增加先升后降, 在施氮量 $250 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时达最高, 为 $6651 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (图 8-C)。

在黄土高原地区, 不同的年均降水量下氮肥对冬小麦水分利用效率的影响不同, 在年均降水量 $\leq 600 \text{ mm}$ 地区施氮后冬小麦水分利用效率整体上增加了 69.86% ($n=339$), 低于年均降水量 $>600 \text{ mm}$ 地区 83.40% 的增幅 ($n=77$) (图 2-B-d)。在年均降水量 $>600 \text{ mm}$ 地区, 施氮后冬小麦水分利用效率整体

上可达 $16.05 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$, 而在年均降水量 $\leq 600 \text{ mm}$ 地区为 $10.86 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$, 两者之间差异显著 ($P<0.05$) (图 7-B)。在年均降水量 $\leq 600 \text{ mm}$ 地区, 施氮量 $244 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时水分利用效率基本达到稳定水平, 为 $13.07 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$ (图 8-B); 在年均降水量 $>600 \text{ mm}$ 的地区, 随施氮量的增加水分利用效率先升后降, 在施氮量 $235 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时达最高 ($19.23 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$) (图 8-D)。

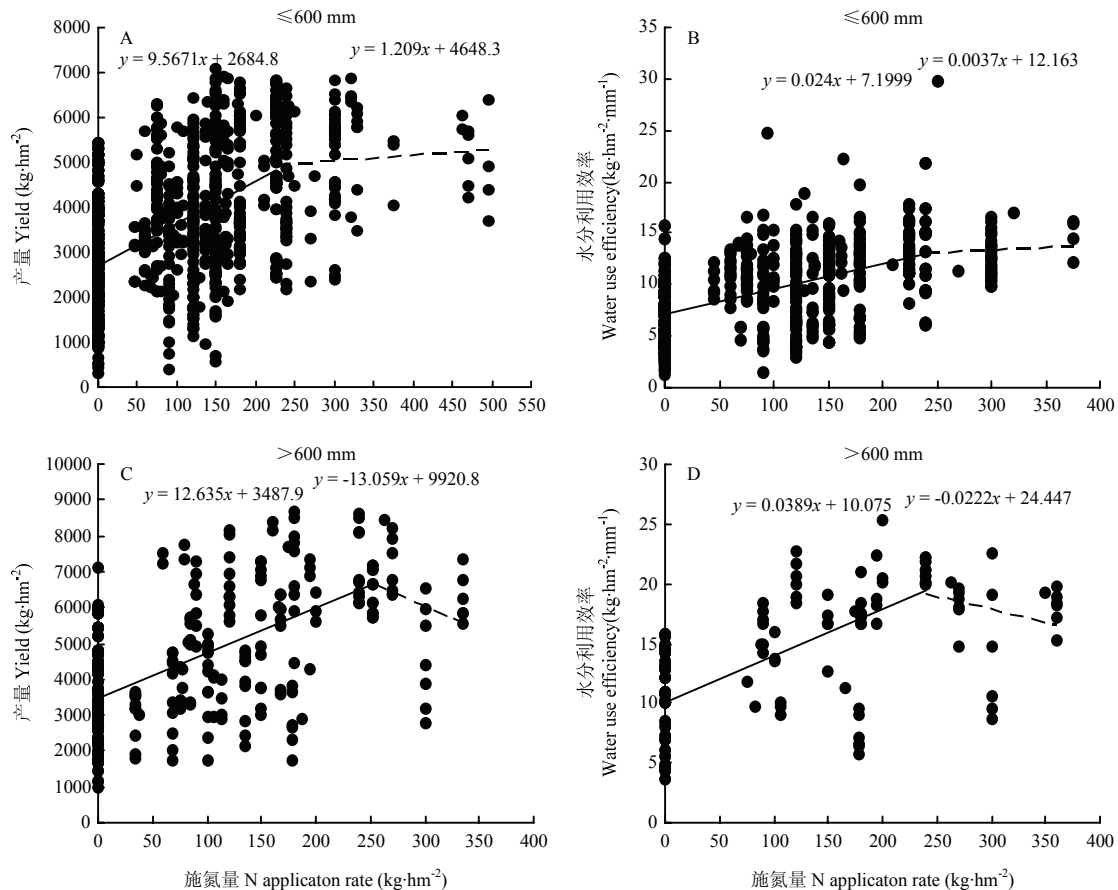


图 8 不同年均降水量下施氮量与冬小麦产量及水分利用效率的关系

Fig. 8 The relationship between nitrogen rates and winter wheat yield and water use efficiency in different annual average precipitation

2.4 不同耕层有机质含量下施氮对冬小麦产量和水分利用效率的影响

在黄土高原地区, 不同的耕层有机质含量下施氮对冬小麦产量的影响不同, 在耕层有机质含量 $\leq 12 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的条件下, 施氮使冬小麦产量整体增加了 78.24% ($n=293$), 高于耕层有机质含量 $> 12 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 条件下 60.75% 的增幅 ($n=345$) (图 2-A-e)。当耕

层有机质含量 $> 12 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 施氮后冬小麦产量整体可达 $5097 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 而耕层有机质含量 $\leq 12 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时为 $3682 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 两者之间差异显著 ($P<0.05$) (图 9-A)。在耕层有机质含量 $\leq 12 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 条件下, 产量随施氮量的增加先升后降, 在施氮 $226 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时最高 ($4531 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) (图 10-A); 在耕层有机质含量 $> 12 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 条件下, 施氮量 $163 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时冬

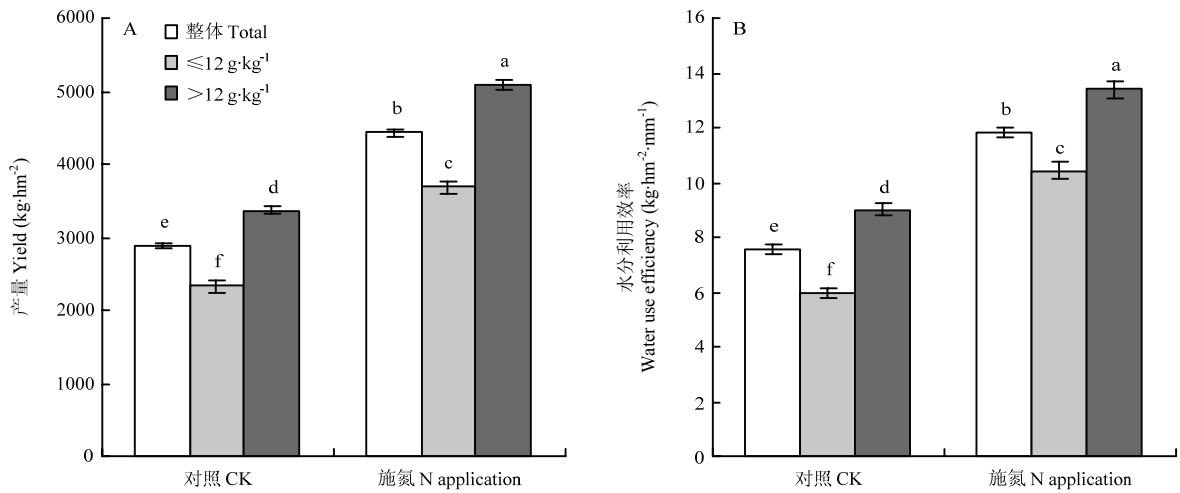


图 9 不同耕层有机质含量下施氮对冬小麦产量 (A) 和水分利用效率 (B) 的影响

Fig. 9 Effect of nitrogen application on yield (A) and water use efficiency (B) of winter wheat under different topsoil organic matter contents

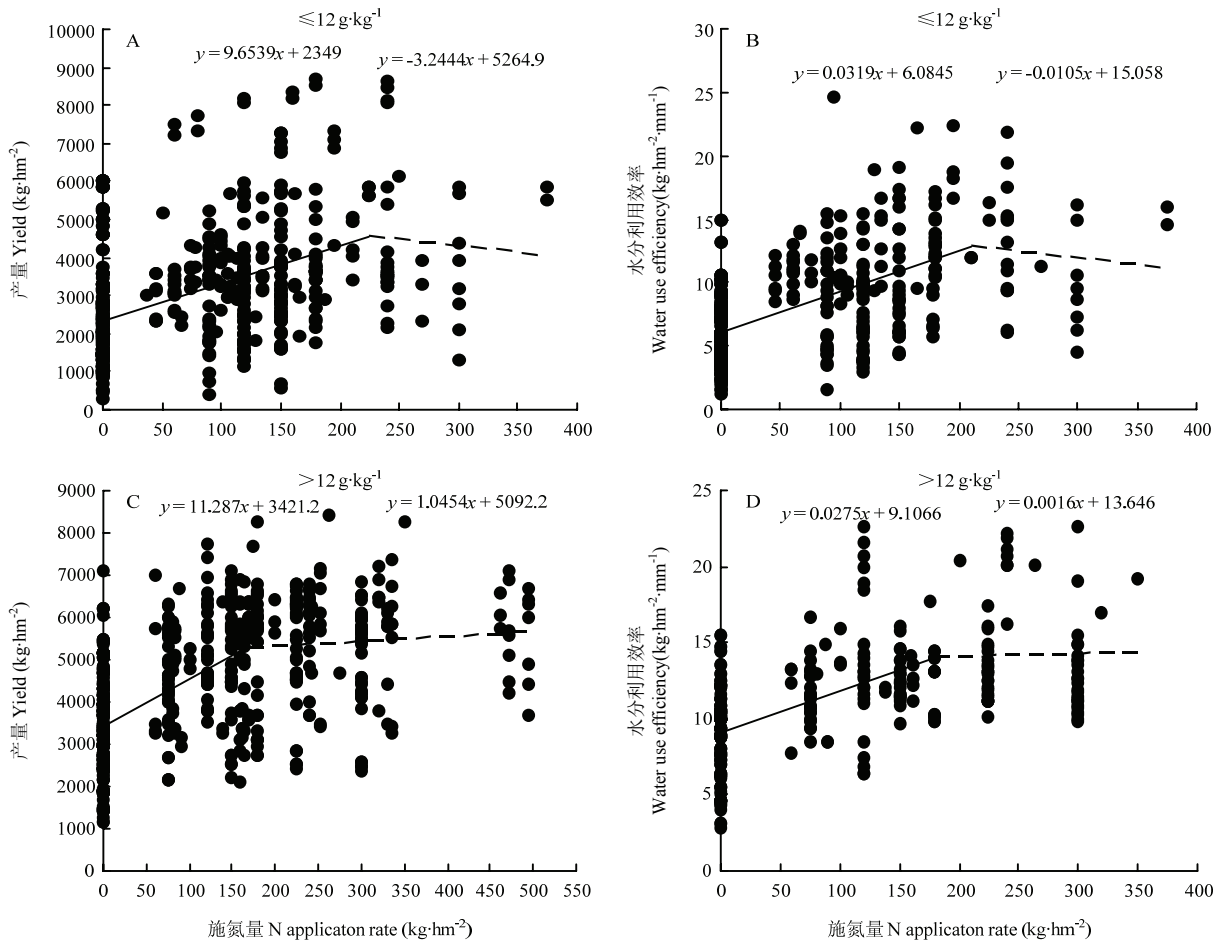


图 10 不同耕层有机质含量下施氮量与冬小麦产量及水分利用效率的关系

Fig. 10 The relationship between nitrogen rates and winter wheat yield and water use efficiency in different topsoil organic matter

小麦产量即趋于稳定, 达到 $5\ 263\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (图 10-C)。

在黄土高原地区, 不同的耕层有机质含量下氮肥对冬小麦水分利用效率的影响不同, 在耕层有机质含量 $\leq 12\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的条件下, 施氮使冬小麦水分利用效率增加了 86.55% ($n=199$), 高于耕层有机质含量 $> 12\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时的 65.75% ($n=157$) (图 2-B-e)。在耕层有机质含量 $> 12\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 施氮后冬小麦水分利用效率可达 $13.38\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$, 而耕层有机质含量 $\leq 12\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时为 $10.42\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$, 两者之间差异显著 ($P < 0.05$) (图 9-B)。在耕层有机质含量 $\leq 12\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 条件下, 水分利用效率随施氮量的增加先升后降, 在施氮量 $212\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时达最高 ($12.84\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$) (图 10-B); 在耕层有机质含量 $> 12\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 条件下, 水分利用效率随施氮量的增加先增加而后基本稳定, 施氮量 $175\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时基本达到稳定水平, 为 $13.93\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$ (图 10-D)。

3 讨论

3.1 施氮对黄土高原冬小麦产量和水分利用效率的整体影响分析

黄土高原大部分区域土壤贫瘠, 有机质含量偏低, 严重限制了作物的产量^[5]。氮素是限制黄土高原冬小麦产量和水分利用效率的关键因子之一, 氮肥的施用提高了土壤含氮量^[8, 11], 缓解了土壤供氮能力与小麦生长发育对氮素需求间的矛盾。氮素促进了小麦根系的发育, 提高了其对土壤水分的利用能力^[11], 也增加了小麦有效分蘖数、单位面积穗数及穗粒数^[22], 因此施氮从整体上显著提高了该地区冬小麦产量和水分利用效率, 其中产量的增长率为 66% , 水分利用效率增长率可达 72% 。

3.2 不同分组中施氮对冬小麦产量和水分利用效率的影响分析

3.2.1 区域 本研究结果表明, 氮肥对冬小麦产量和水分利用效率的影响在黄土高原不同区域间存在差异。其主要原因是黄土高原各区域的气候环境不同。受季风强度的影响, 黄土高原由东南向西北跨越了半湿润区、半干旱区和干旱区, 降水的时空差异大, 降水量沿东南-西北一线递减^[23]。由于地形、海拔等的影响, 温度也沿东南向西北逐渐降低^[15]。除此之外, 土壤肥力特性、主要的栽培品种以及耕作方式等在不同区域间的差异也可能导致氮肥效应的不同^[24-25]。在东南部, 较高的降水量和温度更有利于小麦的生长, 因此东南部冬小麦产量和水分利用效率整

体上均显著高于西北部。施氮后西北部冬小麦产量的增长率高于东南部, 而水分利用效率的增长率低于东南部, 原因是施氮更能促进较干旱的西北部小麦根系的生长, 缓解干旱对产量的影响, 但同时也增大了对深层土壤水分的消耗^[26]。不管是东南部还是西北部, 冬小麦产量和水分利用效率均随施氮量的增加先增加再降低或先增加后保持稳定, 主要原因是过量施氮导致土壤中养分失衡, 硝酸还原酶等氮素相关转化酶活性降低, 作物体内同化物的转移受阻^[27-30]。西北部和东南部在实现冬小麦最高产量和最高水分利用效率的施氮量上存在差异, 主要因为各区域间施氮效应及各区域能实现的最高产量和最高水分利用效率不同。

3.2.2 年均温 本研究发现, 在黄土高原不同年均温条件下, 施氮对冬小麦产量及水分利用效率的影响存在差异。主要原因可能是温度是影响氮素转化的关键因子之一, 土壤中氮素相关转化酶活性与温度密切相关^[31-33]。同时, 温度通过影响植物的生长进而影响植物对氮素的吸收利用^[34]。在年均温 $\leq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 地区, 施氮后冬小麦产量和水分利用效率的相对变化率高于年均温 $> 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 地区。其主要原因是较高的温度下土壤氮素相关转化酶活性较强, 有利于氮素的分解转化及作物的吸收^[33], 因此年均温较低的地区土壤氮素对作物生产的限制更大。年均温 $\leq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 地区实现最高产量和最高水分利用效率需要施更多的氮肥, 主要因为较低的温度限制了土壤中有机氮的矿化, 限制了土壤的供氮能力。

3.2.3 年均降水 在黄土高原地区, 水分是冬小麦生产中最主要的限制因素^[35], 因此在年均降水量 $> 600\ \text{mm}$ 的地区冬小麦产量和水分利用效率整体上均显著高于年均降水量 $\leq 600\ \text{mm}$ 地区。本研究结果表明, 施氮对冬小麦的效应受年降水量的影响。可能是因为土壤水分状况决定着作物对氮肥的响应程度, 土壤中氮素相关转化酶活性、微生物群落及植物根系的分布均受到土壤水分的影响^[36-37]。施氮后年均降水量 $\leq 600\ \text{mm}$ 地区冬小麦产量的增长率高于 $> 600\ \text{mm}$ 地区, 而水分利用效率的增长率在 $> 600\ \text{mm}$ 地区更高。主要原因是在降水量较少的地区, 施氮能缓解水分对小麦生长的限制, 但也加大了对土壤水分的消耗^[38-39]。

3.2.4 耕层有机质 本研究结果表明, 不同耕层有机质含量下施氮对冬小麦产量及水分利用效率的影响存在差异。作为衡量土壤肥力的重要指标, 有机质包含

了土壤中 80%以上的氮素,其含量直接影响氮素的供求关系^[40-42]。在耕层有机质含量 $\leq 12 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的条件下,施氮后冬小麦产量和水分利用效率的相对增长率较高,主要归因于较低的有机质含量下氮素对作物的限制作用更强。与耕层有机质含量 $> 12 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 条件相比,耕层有机质含量 $\leq 12 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时需要更多的氮肥才能获得最高的产量和水分利用效率,主要因为在有机质含量较低的土壤条件下,需要更多的外源氮素才能满足冬小麦高产的需求。

3.3 研究的局限性及研究意义

由于黄土高原地区冬小麦生产中氮肥施用的多样性和复杂性,本研究未将有机肥、磷钾肥等纳入分析。因所获取的数据量有限,本研究也未考虑施氮方式、氮肥种类及冬小麦品种对肥效的影响。本研究纳入整合分析的独立研究基本涵盖了黄土高原冬小麦分布区,但各研究分布点相对集中,限制了区域分组中结论对区域的覆盖度。水分利用效率对氮肥的响应受多个因子的限制,其与产量对氮肥的响应间存在差异,本研究未对这种差异进行深入分析。尽管如此,本研究所得结论与实际生产基本相符,对黄土高原冬小麦合理施肥具有一定的参考价值。

4 结论

(1) 在黄土高原地区,施氮后冬小麦产量和水分利用效率的相对增长率分别为 66.09%和 72.38%。施氮后产量的相对增长率在西北部更高,而水分利用效率相对增长率在东南部更高。西北部实现最高产的施氮量为 $212 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,东南部为 $232 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

(2) 施氮后冬小麦产量和水分利用效率的增长率均在年均温 $\leq 10^\circ\text{C}$ 地区更高。年均温 $> 10^\circ\text{C}$ 地区实现最高产的施氮量为 $189 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,年均温 $\leq 10^\circ\text{C}$ 地区为 $225 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

(3) 施氮后产量的相对增长率在年均降水量 $\leq 600 \text{ mm}$ 地区更高,而水分利用效率在 $> 600 \text{ mm}$ 地区更高。在年均降水量 $> 600 \text{ mm}$ 地区,实现最高产的施氮量为 $250 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,在年均降水量 $\leq 600 \text{ mm}$ 地区为 $235 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

(4) 施氮后冬小麦产量和水分利用效率的相对增长率在耕层有机质含量 $\leq 12 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时更高。在耕层有机质含量 $> 12 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 条件下,实现最高产的施氮量为 $163 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,耕层有机质含量 $\leq 12 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时则为 $226 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

References

- [1] 崔佩佩,丁玉川,焦晓燕,武爱莲,王劲松,董二伟,郭珺,王立革. 氮肥对作物的影响研究进展. 山西农业科学, 2017, 45(4): 663-668.
- [2] 巨晓棠,张福锁. 关于氮肥利用率的思考. 生态环境, 2003, 12(2): 192-197.
- [3] HUSSAIN M, CHEEMA S A, ABBAS R Q, ASHRAF M F, SHAHZAD M, FAROOQ M, JABRAN K. Choice of nitrogen fertilizer affects grain yield and agronomic nitrogen use efficiency of wheat cultivars. *Journal of Plant Nutrition*, 2018(4): 2330-2343.
- [4] 李廷亮,谢英荷,高志强,洪坚平,孟丽霞,马红梅,孟会生,贾俊香. 黄土高原旱地小麦覆膜增产与氮肥增效分析. 中国农业科学, 2018, 51(14): 2735-2746.
- [5] LI T L, XIE Y H, GAO Z Q, HONG J P, MENG L X, MA H M, MENG H S, JIA J X. Analysis on yield increasing and nitrogen efficiency enhancing of winter wheat under film mulching cultivation in the Loess Plateau. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(14): 2735-2746. (in Chinese)
- [6] 杨昉,张树兰,杨学云,孙本华. 长期定位施肥对旱作壤土小麦产量、养分效率及养分平衡的影响. 土壤通报, 2017, 48(5): 1162-1168.
- [7] YANG Y, ZHANG S L, YANG X Y, SUN B H. Effect of long-term fertilization on wheat yield, nutrient use efficiency and nutrient balance in rainfed LouSoil. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(5): 1162-1168. (in Chinese)
- [8] WANG C H, ZHU F, ZHAO X, DONG K H. The effects of N and P additions on microbial N transformations and biomass on saline-alkaline grassland of Loess Plateau of Northern China. *Geoderma*, 2014, 213: 419-425.
- [9] 张亮. 关中麦玉轮作区施氮对秸秆还田小麦产量和秸秆养分释放的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- [10] ZHANG L. Effects of nitrogen fertilizer on yield of winter wheat and straw decomposition under maize straw returning in Guanzhong irrigation district [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012. (in Chinese)
- [11] 杨君林,车宗贤,冯守疆,赵欣楠,张旭临. 氮素营养对旱地小麦群体生长特性的调控. 甘肃农业科技, 2018(11): 65-68.

- YANG J L, CHE Z X, FENG S J, ZHAO X N, ZHANG X L. Regulation of nitrogen nutrition on population growth characteristics of dryland wheat. *Gansu Agricultural Science and Technology*, 2018(11): 65-68. (in Chinese)
- [9] 张昊青. 黄土高原旱地麦田有机无机配施减氮增效作用研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- ZHANG H Q. Reducing nitrogen fertilization rate and improving winter wheat yield through a combination of manure and chemical fertilizer in the Loess Plateau [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017. (in Chinese)
- [10] ZHONG Y Q W, SHANGGUAN Z P. Water consumption characteristics and water use efficiency of winter wheat under long-term nitrogen fertilization regimes in Northwest China. *PLoS ONE*, 2014, 9: e98850.
- [11] WANG L, PALTA J A, CHEN W, CHEN Y L, DENG X P. Nitrogen fertilization improved water-use efficiency of winter wheat through increasing water use during vegetative rather than grain filling. *Agricultural Water Management*, 2018, 197: 41-53.
- [12] 栗丽, 洪坚平, 王宏庭, 谢英荷, 张璐. 水氮处理对冬小麦生长、产量和水氮利用效率的影响. *应用生态学报*, 2013, 24(5): 1367-1373.
- LI L, HONG J P, WANG H T, XIE Y H, ZHANG L. Effects of watering and nitrogen fertilization on growth, grain yield and water and nitrogen use efficiency of winter wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(5): 1367-1373. (in Chinese)
- [13] 张厚华, 黄占斌. 黄土高原生物气候分区与该区生态系统的恢复. *干旱区资源与环境*, 2001, 15(1): 64-71.
- ZHANG H H, HUANG Z B. Bio-climatic division and restoration of the degraded ecosystem on the Loess Plateau. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2001, 15(1): 64-71. (in Chinese)
- [14] 王利娜, 朱清科, 仝小林, 王瑜, 陈文思, 卢纪元. 黄土高原近 50 年降水量时空变化特征分析. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(3): 206-212.
- WANG L N, ZHU Q K, TONG X L, WANG Y, CHEN W S, LU J Y. Characteristic analysis of temporal and spatial variation of precipitation during recent 50 years in Loess Plateau. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34(3): 206-212. (in Chinese)
- [15] 李振朝, 韦志刚, 文军, 符睿. 近 50 年黄土高原气候变化特征分析. *干旱区资源与环境*, 2008(3): 57-62.
- LI Z C, WEI Z G, WEN J, FU R. Analyses on climate variation characteristics over the Loess Plateau in recent 50 years. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008(3): 57-62. (in Chinese)
- [16] 冯永忠, 刘志超, 刘强, 成敏, 杨改河. 黄土高原旱作农区气候干旱时空特征分析. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(2): 218-223.
- FENG Y Z, LIU Z W, LIU Q, CHENG M, YANG G H. Temporal and spatial characteristics of dry climate in rain-fed farming area of the Loess Plateau. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(2): 218-223. (in Chinese)
- [17] 魏欢欢, 王仕稳, 杨文稼, 孙海妮, 殷俐娜, 邓西平. 免耕及深松耕对黄土高原地区春玉米和冬小麦产量及水分利用效率影响的整合分析. *中国农业科学*, 2017, 50(3): 461-477.
- WEI H H, WANG S W, YANG W J, SUN H N, YIN L N, DENG X P. Meta analysis on impact of no-tillage and subsoiling tillage on spring maize and winter wheat yield and water use efficiency on the Loess Plateau. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(3): 461-477. (in Chinese)
- [18] HEDGES L V, CURTIS G P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology. *Ecology*, 1999, 80(4): 1150-1156.
- [19] LI Q, LI H B, ZHANG L, ZHANG S Q, CHEN Y L. Mulching improves yield and water-use efficiency of potato cropping in China: A meta-analysis. *Field Crops Research*, 2018, 221: 50-60.
- [20] KNORR M, FREY S D, CURTIS P S. Nitrogen additions and litter decomposition: A meta-analysis. *Ecology*, 2005, 86(12): 3252-3257.
- [21] ROSENBERG M S, ADAMS D C, GUREVITCH J. *MetaWin. Statistical Software for Meta-Analysis with Resampling Tests*. America: Sinauer Associates Inc, 1997.
- [22] 蔺世召, 葛伟, 熊淑萍, 马新明, 张营武, 杜少勇. 施氮水平对不同小麦品种氮代谢相关指标及产量的影响. *河南农业大学学报*, 2011, 45(5): 514-518.
- LIN S Z, GE W, XIONG S P, MA X M, ZHANG Y W, DU S Y. Effect of different fertilizer treatments on the relative indexes of the nitrogen metabolism and yield of different wheat varieties. *Journal of Henan Agricultural University*, 2011, 45(5): 514-518. (in Chinese)
- [23] 肖蓓, 崔步礼, 李东昇, 常学礼. 黄土高原不同气候区降水时空变化特征. *中国水土保持科学*, 2017, 15(1): 51-61.
- XIAO B, CUI B L, LI D S, CHANG X L. Temporal and spatial variations of precipitation in different climatic regions of the Loess Plateau. *Science of Soil and Water Conservation*, 2017, 15(1): 51-61. (in Chinese)
- [24] 谢云, 王延华, 杨浩. 土壤氮素迁移转化研究进展. *安徽农业科学*, 2013, 41(8): 3442-3444, 3462.
- XIE Y, WANG Y H, YANG H. Research progress on transfer and transformation of soil nitrogen. *Journal of Anhui Agricultural*

- Sciences*, 2013, 41(8): 3442-3444, 3462. (in Chinese)
- [25] ZHANG J, CAI Z, MÜLLER C. Terrestrial N cycling associated with climate and plant-specific N preferences: A review. *European Journal of Soil Science*, 2018, 69: 488-501.
- [26] 段文学, 于振文, 张永丽, 王东, 石玉. 施氮量对旱地小麦耗水特性和产量的影响. *作物学报*, 2012, 38(9): 1657-1664.
- DUAN W X, YU Z W, ZHANG Y L, WANG D, SHI Y. Effects of nitrogen application rate on water consumption characteristics and grain yield in rainfed wheat. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(9): 1657-1664. (in Chinese)
- [27] 张弦, 苏豫梅, 高文伟, 雷钧杰. 不同施氮水平对小麦旗叶氮素代谢相关酶活性的影响. *新疆农业大学学报*, 2014, 37(4): 317-320.
- ZHANG X, SU Y M, GAO W W, LEI J J. Effects of nitrogen application rate on nitrogen metabolism and related enzyme activities of wheat. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2014, 37(4): 317-320. (in Chinese)
- [28] 孟维伟, 王东, 于振文. 施氮量对小麦氮代谢相关酶活性和子粒蛋白质品质的影响. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(1): 10-17.
- MENG W W, WANG D, YU Z W. Effects of nitrogen fertilization on activities of nitrogen metabolism related enzymes and grain protein quality of wheat. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(1): 10-17. (in Chinese)
- [29] 易媛, 董召娣, 张明伟, 蔡宝宾, 朱新开. 减氮对半冬性中筋小麦产量、NUE 及氮代谢关键酶活性的影响. *核农学报*, 2015, 29(2): 365-374.
- YI Y, DONG Z D, ZHANG M W, CAI B B, ZHU X K. Effects of reduction nitrogen on grain yield, NUE and enzymes activities related to nitrogen metabolism in semi-winter medium-gluten wheat. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2015, 29(2): 365-374. (in Chinese)
- [30] 蔡瑞国, 张迪, 张敏, 李瑞奇, 王文颇. 雨养和灌溉条件下施氮量对小麦干物质积累和产量的影响. *麦类作物学报*, 2014, 34(2): 194-202.
- CAI R G, ZHANG D, ZHANG M, LI R Q, WANG W P. Effects of nitrogen application rate on dry matter accumulation and grain yield of winter wheat under irrigated and rainfed conditions. *Journal of Triticeae Crops*, 2014, 34(2): 194-202. (in Chinese)
- [31] 周旋, 吴良欢, 戴锋. 土壤温度和含水量互作对抑制剂抑制氮素转化效果的影响. *农业工程学报*, 2017, 33(20): 106-115.
- ZHOU X, WU L H, DAI F. Inhibition effect of inhibitors on nitrogen transformation affected by interaction of soil temperature and water content. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(20): 106-115. (in Chinese)
- [32] 王爽. 不同温度条件下外源无机氮素向土壤氨基酸的转化[D]. 大连: 大连交通大学, 2017.
- WANG S. Transformation of exogenous nitrogen to soil amino acids at different temperature[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
- [33] 田飞飞, 纪鸿飞, 王乐云, 郑西来, 辛佳, 能惠. 施肥类型和水热变化对农田土壤氮素矿化及可溶性有机氮动态变化的影响. *环境科学*, 2018, 39(10): 4717-4726.
- TIAN F F, JI H F, WANG L Y, ZHENG X L, XIN J, NENG H. Effects of various combinations of fertilizer, soil moisture, and temperature on nitrogen mineralization and soluble organic nitrogen in agricultural soil. *Environmental Science*, 2018, 39(10): 4717-4726. (in Chinese)
- [34] 窦晶鑫, 刘景双, 王洋, 赵光影. 模拟土壤温度升高对湿草甸小叶章生长及生理特性的影响. *应用生态学报*, 2009, 20(8): 1845-1851.
- DOU J X, LIU J S, WANG Y, ZHAO G Y. Effects of simulated soil warming on the growth and physiological characters of *Deyeuxia angustifolia*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(8): 1845-1851. (in Chinese)
- [35] DENG X P, SHAN L, ZHANG H P, TURNER N C. Improving agricultural water use efficiency in arid and semiarid areas of China. *Agricultural Water Management*, 2006, 80(1/3): 23-40.
- [36] 秦文利. 氮对亏缺灌溉冬小麦地上及地下部分生长的影响机制. *河北农业科学*, 2018, 22(4): 43-46.
- QIN W L. Mechanism of effects of nitrogen on growth of aboveground and underground of winter wheat under deficit irrigation. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2018, 22(4): 43-46. (in Chinese)
- [37] 黄玲, 杨文平, 胡喜巧, 陶焯, 姚素梅, 欧行奇. 水氮互作对冬小麦耗水特性和氮素利用的影响. *水土保持学报*, 2016, 30(2): 168-174.
- HUANG L, YANG W P, HU X Q, TAO Y, YAO S M, OU X Q. Effects of irrigation and nitrogen interaction on water consumption characteristics and nitrogen utilization of winter wheat. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(2): 168-174. (in Chinese)
- [38] DANG T H, CAI G X, GUO S L, HAO M D, HENG L K. Effect of nitrogen management on yield and water use efficiency of rainfed wheat and maize in northwest China. *Pedosphere*, 2006, 16(4): 495-

- 504.
- [39] LIU W X, MA G, WANG C Y, WANG J R, LU H F, LI S S, FENG W, XIE Y X, MA D Y, KANG G Z. Irrigation and nitrogen regimes promote the use of soil water and nitrate nitrogen from deep soil layers by regulating root growth in wheat. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 32.
- [40] 孟繁华. 土壤供氮能力的衡量指标. 河南农业, 2017(25): 18-19.
MENG F H. Measuring indicators of soil nitrogen supply capacity. *Agriculture of Henan*, 2017(25): 18-19. (in Chinese)
- [41] 朱洪芬, 南锋, 徐占军, 荆耀栋, 段永红, 毕如田. 黄土高原盆地土壤有机质与影响因子的空间多尺度关系. 生态学报, 2017, 37(24): 8348-8360.
ZHU H F, NAN F, XU Z J, JING Y D, DUAN Y H, BI R T. Multi-scale spatial relationships between soil organic matter and influencing factors in basins of the Chinese Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(24): 8348-8360. (in Chinese)
- [42] 解文艳, 周怀平, 杨振兴, 冯悦晨, 白雪, 杜艳玲. 黄土高原东部潇河流域农田土壤有机质时空变异及影响因素. 农业资源与环境学报, 2019, 36(1): 96-104.
XIE W Y, ZHOU H P, YANG Z X, FENG Y C, BAI X, DU Y L. The spatial-temporal variation of soil organic matter and its influencing factors in Xiaohu River basin in eastern Loess Plateau, China. *Journal of Agricultural Resource and Environment*, 2019, 36(1): 96-104. (in Chinese)

(责任编辑 杨鑫浩)