

中国土壤与肥料  
*Soil and Fertilizer Sciences in China*  
ISSN 1673-6257, CN 11-5498/S

## 《中国土壤与肥料》网络首发论文

题目： 施氮量与灌水上下限对黄秋葵产量和养分吸收的交互作用  
作者： 徐声辉，牛丽，张认连，黄运湘，龙怀玉  
收稿日期： 2022-11-11  
网络首发日期： 2023-05-17  
引用格式： 徐声辉，牛丽，张认连，黄运湘，龙怀玉. 施氮量与灌水上下限对黄秋葵产量和养分吸收的交互作用[J/OL]. 中国土壤与肥料.  
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5498.S.20230516.1741.002.html>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.22699

## 施氮量与灌水上下限对黄秋葵产量和养分吸收的交互作用

徐声辉<sup>1, 2</sup>, 牛 丽<sup>2</sup>, 张认连<sup>2</sup>, 黄运湘<sup>1\*</sup>, 龙怀玉<sup>2\*</sup>

(1.湖南农业大学资源环境学院, 湖南长沙 410128; 2.中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

**摘要:** 探讨施氮量与灌水上下限对黄秋葵养分吸收的交互作用, 为黄秋葵的水肥管理提供理论及参数依据。采用土壤盆栽试验, 设置 45%~55% FC(W1)、35%~65% FC(W2)、25%~75% FC(W3) 3 种灌水上下限及 0 kg·hm<sup>-2</sup> (N0)、110kg·hm<sup>-2</sup> (N1)、330kg·hm<sup>-2</sup> (N2) 3 个氮水平, 观测不同施氮量和灌水上下限对黄秋葵生长发育、生理响应及养分吸收的影响。结果表明, 相同施氮水平, 黄秋葵不同器官生物量、果实产量、灌溉水分生产率及氮磷钾养分积累量以 W1 最高。相同灌水上下限, 黄秋葵不同器官生物量、果实产量、谷氨酰胺合成酶活性、灌溉水分生产率及氮肥偏生产力以 N1 最高, 各处理之间差异显著。水、氮之间表现显著的互作效应, N1W1 处理的黄秋葵总生物量、果实产量、灌溉水分生产率和氮肥偏生产力最高, 分别为 446.4g、201.3g、6.9g/kg 和 108.7kg/kg, 显著高于最低处理 N2W3 (190.3g、64.9g、2.4g/kg 和 11.7kg/kg), 分别提高了 57.4%、67.8%、65.2% 和 89.2%。综合分析表明: 高氮高水处理 (N2W3) 显著降低黄秋葵产量及水肥利用效率, 黄秋葵产量、灌溉水分生产率及养分吸收综合体现的最优模式为 110 kg·hm<sup>-2</sup> 施氮量, 45%~55%FC 灌水上下限 (N1W1), 此研究可为丰富黄秋葵高产栽培提供理论依据。

**关键词:** 黄秋葵; 灌水上下限; 施氮量; 产量; 养分

黄秋葵(*Okra, Abelmoschus esculentus L.*)别名羊角菜, 属锦葵科的一年生草本植物, 在世界各地广泛种植和销售<sup>[1]</sup>。黄秋葵的果实、嫩叶、花、芽和种子都可食用, 同时也是一种重要的药用植物<sup>[2]</sup>, 有治疗糖尿病、降低血脂、防癌抗癌以及提高免疫力等药用或保健功效<sup>[3, 4]</sup>。近年来, 随着黄秋葵营养价值的挖掘, 使其得以大面积推广种植<sup>[5]</sup>, 并对其高产栽培及水肥管理开展了大量的研究工作。相关氮肥试验研究表明<sup>[6-9]</sup>, 随着施氮量的增加, 黄秋葵株高和产量呈先升后降趋势。Chaturvedi 等<sup>[10]</sup>对黄秋葵 4 个生长阶段进行干旱胁迫 (60%FC), 结果发现干旱胁迫显著降低黄秋葵营养期和花期的生长速度以及生物量的分配比例。刘志媛等<sup>[11]</sup>研究表明适宜秋葵生长的相对土壤含水量为 40%~60%。王继玥等<sup>[12]</sup>试验表明随着灌水时间间隔的增加, 黄秋葵农艺性状和产量均降低。但灌溉水分上、下限的变化对黄秋葵生长发育的影响鲜见研究报道, 而针对其他作物<sup>[13-17]</sup> 的研究却有广泛的报道。李耀霞等<sup>[13]</sup>通过设置相同灌水下限 (50%FC)、不同灌水上限 (70%、80%、90% FC) 以及 NPK 3 个施用水平, 研究发现灌水上限为 80%FC、施肥量为中肥 (N 285 kg·hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 165kg·hm<sup>-2</sup>、K<sub>2</sub>O 375kg·hm<sup>-2</sup>) 可显著提高温室番茄产量和水分利用效率。陈凯丽等<sup>[14]</sup>研究不同灌水下限 (45%、60%、75%FC, 灌水上限均为 100%FC,) 和不同施氮量 (45、111、146 kg·hm<sup>-2</sup>) 对冬小麦生长、产量和耗水特性的影响, 结果表明, 灌水下限为 60% FC、施氮量 111kg·hm<sup>-2</sup> 的组合下冬小麦产量和水分利用效率最大, 在此基础上继续增施氮肥或增加灌水下限均不利于节水增产。

本文利用土壤盆栽黄秋葵, 设计 3 种灌水模式和 3 个施氮水平开展水、氮交互试验, 通过对黄秋葵生长发育、氮代谢关键酶的生理响应及养分吸收特征等的研究, 以期探索适合黄秋葵生长发育的水肥管理模式及生理响应机制, 为丰富黄秋葵高产栽培提供理论依据。

**收稿日期:** 2022-11-11; **录用日期:** 2022-11-28

**基金 xiangm:** 国家重点研发计划项目 (2018YFE0112300)

**作者简介:** 徐声辉 (1997-), 男, 安徽马鞍山人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤肥力与作物施肥研究。E-mail:1725586954@qq.com。

**通讯作者:** 黄运湘, E-mail: yxhuang63@163.com.; 龙怀玉, E-mail:longhuaiyu@caas.cn。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试作物

供试作物为黄秋葵。黄秋葵幼苗购自淘宝“水生田园艺旗舰店”。

### 1.2 供试土壤

供试土壤为湖南农业大学耘园基地内由河流冲积物发育的耕型河潮土，采集深度为0~20cm，土壤采集后经过风干、锤碎、混匀，取500g过2mm和0.149mm筛、用于土壤基本理化性质的分析，其余土壤过0.5cm筛，用于土壤盆栽试验。土壤基本理化性质：pH为5.53，有机质19.63 g·kg<sup>-1</sup>，全氮1.28 g·kg<sup>-1</sup>，全磷0.84 g·kg<sup>-1</sup>，碱解氮164.5 mg·kg<sup>-1</sup>、有效磷10.3 mg·kg<sup>-1</sup>、速效钾200.0mg·kg<sup>-1</sup>。土壤质地为壤质黏土（砂粒43.2%、粉粒25.2%、黏粒31.5%），田间持水量(FC)27.6%（体积分数）。

### 1.3 试验设计

采用土壤盆栽试验的方法，于2021年6月~9月在湖南农业大学资源环境学院土肥高效利用试验基地进行。试验设计水分和施氮量2个因素。基于前人研究工作，以适宜黄秋葵生长的土壤含水量为中进行上下浮动，设置3个灌水处理，灌水上下限变化区间分别为45%~55% FC (W1)、35%~65% FC (W2)、25%~75% FC (W3)，用AZS-100土壤水分速测仪监测，每天监测一次，当土壤含水量达到田间持水量下限时采用人工浇灌方式补充水量到上限；施氮量设计3个水平，分别为0 kg·hm<sup>-2</sup> (N0)、110kg·hm<sup>-2</sup> (N1)、330kg·hm<sup>-2</sup> (N2)，采用交互试验进行，共计9个处理。随机区组排列，每处理重复4次，共计36盆。栽培盆选用上宽直径30cm，下宽直径22cm、高24cm的橡胶桶。每盆装土12kg，装土容重为1.1 g·cm<sup>-3</sup>。供试肥料：氮素以硫酸铵(N 21%)、磷素以磷酸二氢钾(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 52% K<sub>2</sub>O 35%)、钾素以硫酸钾(K<sub>2</sub>O 52%)和磷酸二氢钾为肥源。每个处理磷、钾用量一致，磷肥全部作基肥，氮、钾60%做基肥，装盆前将基肥溶于水后均匀拌入土壤中，并将土壤湿度调节至62.5%FC，放置几天后移栽黄秋葵幼苗。40%的氮和钾在苗期和花期各追施20%。

黄秋葵生育期管理：2021年6月8日选择长势一致的黄秋葵幼苗（一叶一心）移栽至盆中，保持土壤湿度60%FC。待黄秋葵长至三叶一心时进行水分处理。黄秋葵整个生育期间进行常规田间管理。2021年9月19日采收，测定黄秋葵植株生物量和养分含量。

### 1.4 测定项目与方法

#### 1.4.1 叶片氮代谢关键酶

苗期（7月21日）将顶端完全展开叶剪下放入液氮，送往上海苗彩生物科技有限公司，测定硝酸还原酶(NR)和谷氨酰胺合成酶(GS)，测定方法采用酶联免疫试剂盒。

#### 1.4.2 植株养分含量

试验结束后，将黄秋葵按根、茎、叶、果实分开采收，置于70℃烘箱内烘干，粉碎混匀后，用于植株养分含量的测定。氮含量采用半微量凯氏定氮法、磷含量采用钼锑抗比色法、钾含量采用火焰光度计法测定<sup>[15]</sup>。

#### 1.4.3 灌溉水分生产率和肥料偏生产力计算<sup>[16,17]</sup>

灌溉水分生产率(*iWUE*, g·kg<sup>-1</sup>) = 黄秋葵产量/灌水量

氮肥偏生产力(*NPFP*, kg·kg<sup>-1</sup>) = 黄秋葵产量/施氮量

### 1.5 数据处理

采用Excel 2019对数据进行统计分析，SPSS 22.0进行差异显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同水氮处理对黄秋葵生物量、产量、*iWUE*和*NPFP*的影响

从表1可以看出，灌水上下限和施氮量显著影响黄秋葵根、茎、叶及总生物量，黄秋葵根、茎、叶及总生物量以N1W1处理最高，分别为42.6g、103.5g、99.0g和446.4g。

相同灌水上下限，黄秋葵根、茎、叶及总生物量随施氮量的增加呈先增高后降低的趋势。相同施氮水平，黄秋葵根、茎、叶及总生物量随灌水区间的增大而降低。

黄秋葵果实产量、*iWUE* 和 *NPPF* 以 N1W1 处理最高，分别为 201.3g、6.9g/kg 和 108.7kg/kg，较最低处理的 N2W3 显著提高 67.8%、65.2% 和 89.2%。随施氮量的增加，W1、W3 的黄秋葵果实产量和 *iWUE* 先升高后降低，W2 的黄秋葵果实产量和 *iWUE* 降低，W1、W2 和 W3 的 *NPPF* 降低。随灌水上下限区间的增大，N0 的果实产量、*iWUE* 降低，N1 的果实产量、*iWUE* 和 *NPPF* 降低，N2 的果实产量、*NPPF* 先升高后降低，*iWUE* 降低。

表 1 不同水氮处理对黄秋葵生物量、*iWUE* 和 *NPPF* 的影响

处理	总生物量 (g FW)	叶生物量 (g FW)	茎生物量 (g FW)	根生物量 (g FW)	果实产量 (g/株)	<i>iWUE</i> (g/kg)	<i>NPPF</i> (kg/kg)
N0W1	316.6bc	38.8e	98.4a	36.6abc	142.8b	4.9b	
N0W2	305.3bc	39.4e	90.5a	35.0bcd	140.4bc	4.6bc	
N0W3	264.6c	40.3e	84.0a	34.2bcd	106.1bcd	3.9bcd	
N1W1	446.4a	99.0a	103.5a	42.6a	201.3a	6.9a	108.7a
N1W2	360.4b	87.0ab	100.2a	41.2ab	131.9bc	4.3bc	71.2b
N1W3	313.3bc	76.9bc	89.4a	30.9cde	116.1bc	4.3bc	62.7b
N2W1	291.6c	73.1bc	98.5a	28.6de	91.4cd	3.1cd	16.4c
N2W2	267.0c	59.2cd	86.2a	25.8e	95.8bcd	3.1cd	17.2c
N2W3	190.3d	41.8de	64.8b	18.8f	64.9d	2.4d	11.7c

注：同列数据后不同小写字母表示不同处理间在  $P < 0.05$  水平差异显著。下同。

## 2.2 不同水氮处理对黄秋葵叶片氮代谢关键酶活性的影响

### 2.2.1 对黄秋葵叶片硝酸还原酶活性的影响

NR 是植物氮代谢中催化硝酸盐还原的关键酶，对整个氮代谢的强弱起到关键调控作用，其活性大小在一定程度上反应了植物氮代谢水平<sup>[18-20]</sup>。由图 1a 可知，黄秋葵叶片 NR 活性以 N1W3 处理最高，为 0.621U/g，较最低处理的 N0W1 显著提高 39.6%。随施氮量的增加，W1、W2 的 NR 活性升高，W3 的 NR 活性先升高后降低。随着灌水上下限区间的增大，N0、N2 的 NR 活性升高，N1 的 NR 活性先降低后升高。

### 2.2.2 对黄秋葵叶片谷氨酰胺合成酶活性的影响

GS 是一种多功能酶，对氮代谢具有重要调节作用，其活性的大小对于铵的代谢速度有直接影响<sup>[21-23]</sup>。由图 1b 可知，黄秋葵叶片 GS 活性以 N1W3 处理最高，为 0.477U/g，较最低处理的 N0W1 显著提高 53.9%。随施氮量的增加，W1 的 GS 活性升高，W2、W3 的 NR 活性先升高后降低。随着灌水上下限区间的增大，N0 的 GS 活性在各处理间差异不显著，N1 的 GS 活性升高，N2 的 GS 活性先降低后升高。

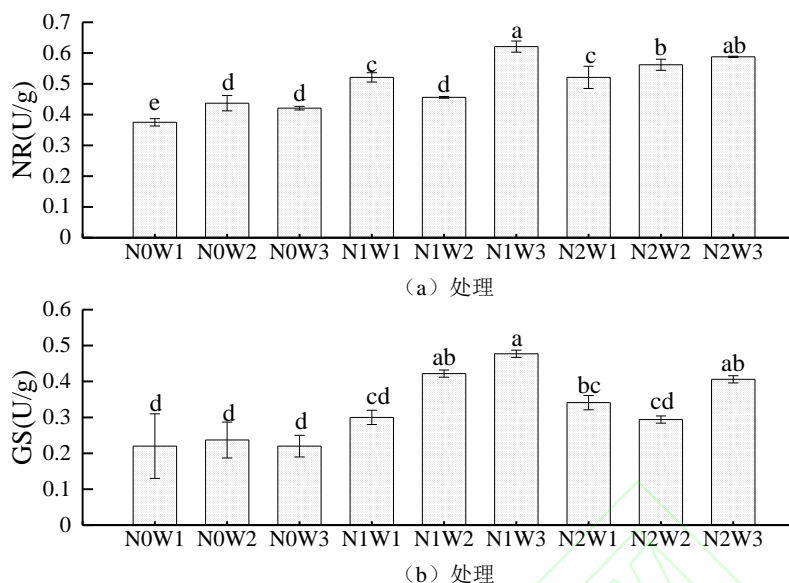


图1 不同水氮处理对黄秋葵叶片氮代谢关键酶活性的影响

注：不同小写字母表示不同处理间在  $P < 0.05$  水平差异显著。下同。

## 2.3 不同水氮处理对黄秋葵养分含量的影响

### 2.3.1 对氮含量的影响

由表 2 可知，灌水上下限和施氮量显著影响黄秋葵不同器官氮含量。黄秋葵氮含量表现为叶>果实>茎>根，其中叶片氮含量以 NOW2 处理最高，为 34.4g/kg，茎秆氮含量以 N2W1 处理最高，为 16.3 g/kg，根系和果实氮含量以 N2W3 处理最高，分别为 13.7 g/kg 和 20.7 g/kg。随施氮量增加，W1、W2 的叶片氮含量先降低后升高，茎秆、根系、果实氮含量升高，W3 的叶片、茎秆、根系、果实氮含量升高。随着灌水上下限区间的增大，N0 的叶片、茎秆、果实氮含量先升高后降低，根系氮含量升高，N1 的叶片氮含量升高，茎秆、根系、果实氮含量先升高后降低，N2 的叶片、茎秆、根系氮含量先降低后升高，果实氮含量升高。

### 2.3.2 对磷含量的影响

由表 2 可知，灌水上下限和施氮量显著影响黄秋葵不同器官磷含量。黄秋葵磷含量表现为叶>果实>茎>根，其中叶片、根系和果实磷含量以 NOW1 处理最高，分别为 5.5 g/kg、1.6 g/kg 和 3.0g/kg，茎秆磷含量以 NOW2 处理最高，为 3.1 g/kg。相同灌水上下限，黄秋葵磷含量随施氮量的增加而降低。相同施氮水平，黄秋葵磷含量随灌水上下限区间的增大而降低。

### 2.3.3 对钾含量的影响

由表 2 可知，灌水上下限和施氮量显著影响黄秋葵不同器官钾含量。黄秋葵钾含量表现为叶>果实>茎>根，其中叶片钾含量以 NOW2 处理最高，为 43.1 g/kg，茎秆和根系钾含量以 N2W3 处理最高，分别为 23.5 g/kg 和 25.0 g/kg，果实钾含量以 NOW1 处理最高，为 27.0 g/kg。随施氮量增加，W1 的叶片、茎秆、果实钾含量先降低后升高，根系钾含量升高，W2 的叶片钾含量先降低后升高，茎秆和果实钾含量降低，根系钾含量升高，W3 的叶片、茎秆、根系钾含量升高，果实钾含量先降低后升高。随着灌水上下限区间的增大，N0 的叶片、茎秆钾含量先升高后降低，根系钾含量先降低后升高，果实钾含量降低，N1 的叶片、茎秆、果实钾含量升高，根系钾含量先升高后降低，N2 的叶片钾含量降低，茎秆、根系钾含量升高，果实钾含量先降低后升高。

表 2 不同水氮处理对黄秋葵不同器官养分含量的影响 (g/kg)

处理	叶片			茎秆			根系			果实		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K
NOW1	28.2c	5.5a	38.3b	2.9f	2.6b	21.3c	2.7g	1.6a	10.7e	12.2e	3.0a	27.0a
NOW2	34.4a	4.8b	43.1a	3.0f	3.1a	22.5b	2.8g	1.6a	8.4f	12.4e	2.9a	24.9b
NOW3	16.6e	3.7c	33.8c	2.7f	2.2c	17.3e	3.1g	1.5a	12.8d	10.7f	2.6b	20.2c
N1W1	24.8d	1.7f	33.3c	8.6e	1.3d	18.9d	7.6e	1.2b	15.3c	17.2d	2.9a	18.9e

N1W2	25.1d	1.8f	36.4b	9.9c	1.1e	20.9c	8.3d	0.9c	15.8c	18.2c	2.6b	19.0e
N1W3	25.9d	2.0ef	37.7b	9.5d	1.3d	22.3b	6.4f	0.8d	13.5d	17.2d	2.4c	19.6d
N2W1	30.6b	2.1de	40.8a	16.3a	0.9g	19.6d	12.9b	1.0c	17.0b	18.7c	2.3c	19.7cd
N2W2	26.4d	1.9ef	38.2b	13.8b	0.9g	19.6d	10.3c	0.7d	17.7b	19.8b	2.1d	18.6e
N2W3	30.5b	2.3d	38.0b	16.2a	1.0f	23.5a	13.7a	1.0c	25.0a	20.7a	2.3c	19.9cd

## 2.4 不同水氮处理对黄秋葵养分积累的影响

### 2.4.1 对氮素养分积累的影响

由图 2 可知,黄秋葵氮素积累总量以 N2W1 处理最高,为 0.951g/株,较最低处理的 N0W1 显著提高 74.9%。黄秋葵氮素养分积累表现为叶>茎>根,其中叶片、茎秆氮素积累以 N2W1 处理最高,分别为 0.462 和 0.409g/株,根系以 N1W1 处理最高,为 0.087 g/株。随施氮量的增加, W1 的叶片、茎秆氮素积累升高,根系氮素积累先升高后降低, W2、W3 的叶片、根系氮素积累先升高后降低,茎秆氮素积累升高。随着灌水上下限区间的增大, N0 的叶片、茎秆、根系氮素积累先升高后降低, N1 的叶片、茎秆氮素积累降低,根系氮素积累先升高后降低, N2 的叶片、茎秆、根系氮素积累降低。

### 2.4.2 对磷素养分积累的影响

由图 3 可知,黄秋葵磷素积累总量以 N0W2 处理最高,为 0.145g/株,较最低处理的 N2W3 显著提高 68.3%。黄秋葵磷素养分积累表现为茎>叶>根,其中叶片磷素积累以 N0W1 处理最高,为 0.057g/株,茎秆、根系以 N0W2 处理最高,分别为 0.080 和 0.017g/株。相同灌水上下限,叶片、茎秆、根系磷素积累随施氮量增加而降低。相同施氮水平,叶片、茎秆、根系磷素积累随灌水上下限区间的增大而降低。

### 2.4.3 对钾素养分积累的影响

由图 4 可知,黄秋葵钾素积累总量以 N1W2 处理最高,为 1.403g/株,较最低处理的 N0W3 显著提高 38.7%。黄秋葵钾素积累表现为茎>叶>根,其中叶片钾素积累以 N1W2 处理最高,为 0.632 g/株,茎秆和根系以 N1W1 处理最高,分别为 0.609 和 0.176 g/株。随施氮量的增加, W1 的叶片钾素积累升高,茎秆、根系钾素积累先升高后降低, W2、W3 的叶片、茎秆、根系钾素积累先升高后降低。随着灌水上下限区间的增大, N0 的叶片、茎秆钾素积累先升高后降低,根系钾素积累先降低后升高, N1 的叶片钾素积累先升高后降低,茎、根钾素积累降低, N2 的叶、茎钾素积累降低,根钾素积累先降低后升高。

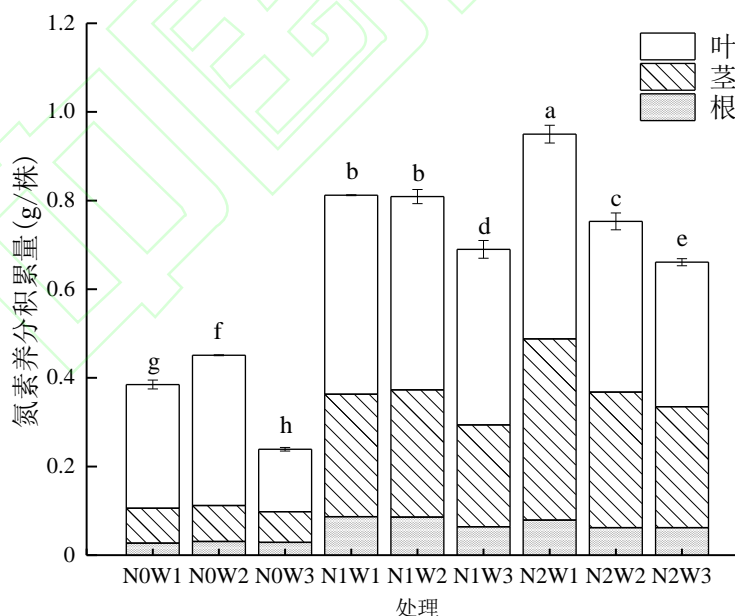


图 2 不同水氮处理对黄秋葵不同器官氮素养分积累的影响

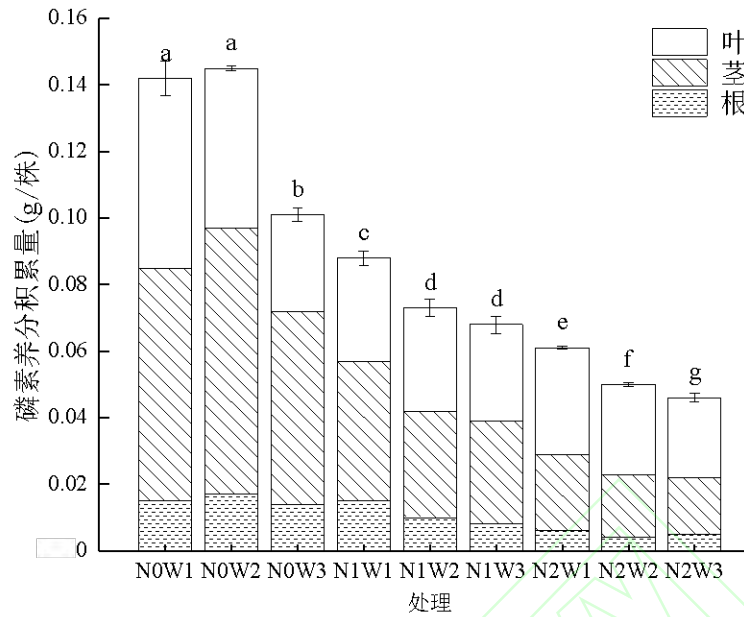


图3 不同水氮处理对黄秋葵不同器官磷素养分积累的影响

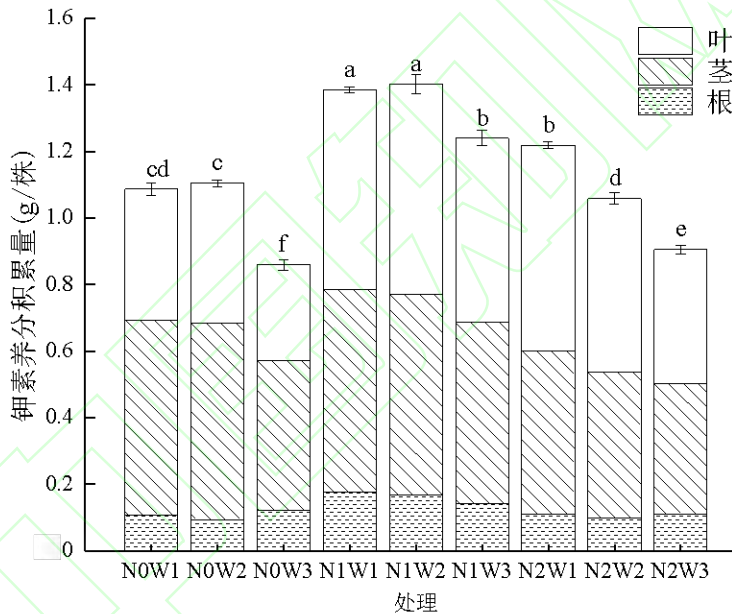


图4 不同水氮处理对黄秋葵不同器官钾素养分积累的影响

### 2.5 黄秋葵不同器官 NPK 含量、积累量与氮代谢关键酶的相关性

相关分析结果(表3)表明,黄秋葵茎秆、根系和果实 N 含量与 NR 和 GS 活性呈极显著正相关关系,叶片 N 含量与其相关不显著;黄秋葵叶片、茎秆和根系 P 含量与 NR 和 GS 活性呈极显著负相关关系,果实 P 含量与 NR 活性呈极显著负相关关系,与 GS 活性呈显著负相关关系;黄秋葵根系 K 含量与 NR 和 GS 活性呈极显著正相关关系,果实 K 含量与其呈极显著负相关关系,叶片 K 含量与其相关不显著,茎秆 K 含量与 NR 活性相关不显著,与 GS 活性呈显著正相关关系。

NR 和 GS 活性与叶片、茎秆、根系 N 素积累正相关,但未达差异显著水平;NR 活性与叶片、茎秆、根系 P 素积累量呈显著负相关关系,GS 活性与茎秆 P 素积累显著负相关,与其他器官相关不显著;NR 和 GS 活性与叶片、根系 K 素积累正相关,与茎秆负相关,但均未达显著差异水平。NR 和 GS 活性与黄秋葵 NPK 积累总量同样表现为 P 素极显著负相关,N、K 相关不显著。

表3 黄秋葵不同器官 NPK 含量、积累量与氮代谢关键酶活性相关性分析

指标	N 含量	P 含量	K 含量	N 积累量	P 积累量	K 积累量
	叶片			叶片		
NR	0.152	-0.739**	-0.015	0.484	-0.725*	0.421
GS	0.097	-0.655**	0.033	0.552	-0.580	0.578
	茎秆			茎秆		
NR	0.730**	-0.719**	0.278	0.651	-0.790*	-0.424
GS	0.566**	-0.637**	0.395*	0.601	-0.709*	-0.075
	根系			根系		
NR	0.664**	-0.771**	0.617**	0.564	-0.753*	0.119
GS	0.509**	-0.669**	0.489**	0.661	-0.625	0.428
	果实			总量		
NR	0.769**	-0.666**	-0.651**	0.606	-0.804**	0.104
GS	0.645**	-0.461*	-0.528**	0.620	-0.697*	0.403

注: \*、\*\*分别表示在 0.05、0.01 水平上显著、极显著相关。

### 3 讨论

氮是植物生长发育必需的大量营养元素，氮素缺乏或过剩严重影响作物的生长发育及产量形成。本研究表明，氮素用量对黄秋葵的生长发育影响显著，黄秋葵总生物量及根、茎、叶生物量均以 N1（施氮量  $110\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ）最高，随着施氮量的增加，其生物量呈下降趋势，这与前人<sup>[24, 25]</sup>的研究结果一致。氮素过量导致根系产生盐胁迫、根系活力下降<sup>[26]</sup>，不利于黄秋葵的生长。保持土壤适宜稳定的湿度有利于作物的生长及对养分的吸收利用，本研究发现，W1（45%~55% FC）的黄秋葵生物量显著高于 W2（35%~65% FC）和 W3（25%~75% FC），其原因可能有：1）当灌溉下限低至为 25%~35%FC 时，黄秋葵因受到干旱胁迫不利于其生长；2）黄秋葵是耐旱不耐涝作物<sup>[27]</sup>，当灌水上限接近 80%FC，又可能因涝渍胁迫<sup>[28]</sup>而影响其生长。大量的研究证实，过高的灌水上限、较低的灌水下限均会导致作物产量和水分利用效率降低<sup>[29-31]</sup>，适宜灌溉量能显著提高水分利用效率<sup>[32]</sup>。本研究中，W1 黄秋葵灌溉水分生产率（*iWUE*）和氮肥偏生产力（*NPFP*）显著高于 W2 和 W3，水氮之间交互作用显著，*iWUE* 和 *NPFP* 均以 N1W1 处理最高，即黄秋葵适宜的水肥组合为 45%~55% FC 灌水量与  $110\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  施肥量组合。

植物氮素营养的代谢是多种酶相互协调作用的复杂过程，硝酸还原酶（NR）和谷氨酰胺合成酶（GS）是植物氮代谢关键酶，可以直接反映植株对氮素的吸收和利用效率，影响植株对氮素的积累<sup>[33, 34]</sup>。本研究中施氮显著提高黄秋葵叶片 NR 和 GS 活性，相关分析表明（表 3），黄秋葵茎秆、根系和果实 N 含量与 NR、GS 活性呈极显著正相关关系，这与前人研究结果一致<sup>[35, 36]</sup>。适当的干旱胁迫可提高 NR 和 GS 活性<sup>[49]</sup>，本研究中，W3 的 NR 和 GS 活性显著高于 W2 和 W1。从水分作用看，稳定适宜的土壤湿度（W1）可促进黄秋葵对氮素养分的吸收。从水氮交互作用看，黄秋葵氮素积累总量以 N2W1 处理最高（图 2），稳定适宜的土壤湿度下适当增加氮素施入量有利于黄秋葵对氮素养分的吸收。

氮磷钾在植物体内具有协同效应，适宜的氮水平有利于作物对磷钾的吸收<sup>[37, 38]</sup>。本研究中，施氮处理提高黄秋葵对钾的积累（图 4），钾素积累总量表现为  $N1 > N2 > N0$ ，但降低了磷的积累（图 3），磷素积累总量表现为  $N0 > N1 > N2$ ，这与陈连珠等<sup>[39]</sup>、唐中霞等<sup>[40]</sup>的研究结果一致。灌水上下限变化对黄秋葵氮磷钾积累量也有显著影响，过高或过低的灌水上下限都会影响黄秋葵对养分的吸收，惠薇<sup>[41]</sup>在对于藜麦养分吸收的研究方面已经验证了这一观点。本研究中，单就水分而言，以 W1 更有利于黄秋葵对磷钾的吸收，从水氮交互作用看，黄秋葵磷素积累总量以 N0W2 处理、钾以 N1W2 处理最高，可能因为适当的干旱胁迫激发了 NR 和 GS 活性及氮的代谢功能，从而促进了作物对磷钾的吸收。

### 4 结论

水氮处理对黄秋葵生物量、果实产量、灌溉水分生产率及肥料偏生产力影响显著，稳定适宜的土壤湿度和适宜的氮肥施用量能够较好地发挥水氮互作效应，在获得较高生物量的



同时提高植株养分吸收量，最终提高产量、灌溉水分生产率及氮肥偏生产力。综合分析表明：110 kg·hm<sup>-2</sup> 施氮量，45%~55%FC 灌水上下限（N1W1）是黄秋葵产量、灌溉水分生产率及养分吸收综合体现的最优模式。

### 参考文献：

- [1] BES A E, AG H, HS A. Response to planting date, stress tolerance and genetic diversity analysis among okra ( *Abelmoschus esculentus* (L.) Moench.) varieties [J]. *Genetic Resources and Crop Evolution: An International Journal*, 2020, 67(2): 831-851.
- [2] Jashandeep K, Mamta P, Dharminder P. Inheritance of resistance to yellow vein mosaic virus in an interspecific cross of okra (*Abelmoschus esculentus*) [J]. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 90(12):2302-2306.
- [3] 刘娜. 黄秋葵的综合利用及前景 [J]. *中国食物与营养*, 2007, 27-30.
- [4] Tian Z H, Miao F T, Zhang X, et al. Therapeutic effect of okra extract on gestational diabetes mellitus rats induced by streptozotocin [J]. *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine*, 2015, 8(12): 1010-1013.
- [5] 张少平, 邱珊莲, 张帅, 等. 黄秋葵种质资源及相关品种选育研究进展 [J]. *农学学报*, 2017, 7(06).
- [6] 缪斌, 徐爱如, 马松高, 等. 出口蔬菜黄秋葵氮肥运筹初探 [J]. *上海农业科技*, 2004, (03).
- [7] Omotoso S, Shittu O. Effect of NPK fertilizer rates and method of application on growth and yield of Okra (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench) [J]. *International Journal of Agricultural Research* 2007, 2(7): 614-619.
- [8] 高尚. 施肥对黄秋葵生长、产量和品质的影响 [D]. 海南大学, 2016.
- [9] 刘梁. 施肥对黄秋葵生产性状及其黄酮含量的影响研究 [D]. 河北工程大学, 2017.
- [10] Chaturvedi A K, Surendran U, Gopinath G, et al. Elucidation of stage specific physiological sensitivity of okra to drought stress through leaf gas exchange, spectral indices, growth and yield parameters [J]. *Agricultural Water Management*, 2019, (222): 92-104.
- [11] 刘志媛, 党选民, 曹振木. 土壤水分对黄秋葵苗期生长及光合作用的影响 [J]. *热带作物学报*, 2003, 24(1): 70-72.
- [12] 王继玥, 石登红, 斌 杜, 等. 水分胁迫对黄秋葵生理以及光合特性的影响 [J]. *热带作物学报*, 2017, 38(9): 1614-1619.
- [13] 李耀霞, 郁继华, 张国斌, 等. 灌水上限和施肥量对温室番茄生长发育的影响 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(42-51).
- [14] 陈凯丽, 赵经华, 付秋萍, 等. 不同水氮处理对滴灌冬小麦生长、产量和耗水特性的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(125-132).
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- [16] 王转, 朱国龙, 龙怀玉, 等. 土壤水分时间变异对玉米生长及水分效率的影响 [J]. *中国农业科技导报*, 2020, 22(11): 153-164.
- [17] 刘亚南, 白美健, 张宝忠, 等. 黄金梨产量及水肥生产率对水氮耦合的响应 [J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(11): 68-75.
- [18] Schrader L E, Ritenour G L, Eilrich G L, et al. Some characteristics of nitrate reductase from higher plants. [J]. *Plant physiology*, 1968, 43(6): 930-940.
- [19] Dalling M J, Boland G, Wilson J. Relation between acid proteinase activity and redistribution of nitrogen during grain development in wheat [J]. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1976, 3(6): 721-730.
- [20] 刘春梅, 王孟雪, 孙海燕, 等. 施氮水平对芸豆叶片氮代谢酶活性和氮吸收及营养品质的影响 [J]. *东北农业科学*, 2020, 45(03): 16-21.
- [21] 王月福, 姜东, 于振文, 等. 氮素水平对小麦籽粒产量和蛋白质含量的影响及其生理基础 [J]. *中国农业科学*, 2003, (05): 513-520.
- [22] 曹让, 梁宗锁, 吴洁云, 等. 干旱胁迫及复水对棉花叶片氮代谢的影响 [J]. *核农学报*, 2013, 27(02): 231-239.
- [23] 武辉, 向镜, 陈惠哲, 等. 花前氮亏缺对水稻叶片氮代谢酶活性的影响 [J]. *中国稻米*, 2017, 23(04): 14-19.
- [24] 何志学, 颀建明, 卢家柱, 等. 氮肥水平对辣椒产量和品质的影响 [J]. *甘肃农业大学学报*, 2017, 52(51-56).
- [25] 吴玥, 寇智瑞, 陈新平, 等. 氮肥供应对辣椒营养品质的影响及评价 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2021, 43(87-94).
- [26] 陈雄伟, 郑春梅, 李晓丹, 等. 不同氮营养水平对水葫芦根系活力的影响 [J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(1657-1659).
- [27] 刘维侠, 党选民, 张秀明. 热带蔬菜—黄秋葵 [J]. *安徽农学通报*, 2006, 67-8+136.

- [28] 李霞, 潘晨, 王小燕, 等. 施氮对涝渍胁迫下作物生长和产量影响的研究进展 [J]. 中国农学通报, 2022, 38(1-6).
- [29] 郭勇, 马娟娟, 郑利剑, 等. 滴灌水分调控对设施芹菜生长与水分利用的影响 [J]. 节水灌溉, 2022, 9-16.
- [30] 张娟, 马福生, 杨胜利, 等. 不同灌水上下限对温室白萝卜产量、品质及 WUE 的影响 [J]. 节水灌溉, 2016, (04): 31-36.
- [31] Cao J, Zhang B, Song Z, et al. Effect of different irrigation maximum on absorption and utilization of water in Chinese kale [J]. *Agricultural Science & Technology*, 2016, 17(2): 344-346, 408.
- [32] Li H T, Li L, Liu N, et al. Root efficiency and water use regulation relating to rooting depth of winter wheat [J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 269.
- [33] 曹兵, 黄志浩, 吴广利, 等. 控释掺混肥一次性减量施用对夏玉米产量、氮肥利用和叶片氮代谢酶活性的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2021, (03): 127-33.
- [34] 王小纯, 王晓航, 熊淑萍, 等. 不同供氮水平下小麦品种的氮效率差异及其氮代谢特征 [J]. 中国农业科学, 2015, 48(13): 2569-2579.
- [35] 李文龙, 吕英杰, 刘笑鸣, 等. 氮肥对不同氮效率玉米氮代谢酶和氮素利用及产量的影响 [J]. 西南农业学报, 2018, 31(09): 1829-1835.
- [36] 金容, 郭萍, 周芳, 等. 控释氮肥比例对玉米氮代谢关键酶活性及干物质积累的影响 [J]. 四川农业大学学报, 2018, 36(729-736).
- [37] 张旭, 熊又升, 谢媛圆, 等. 灌溉方式与施氮量对鲜食玉米生育前期生长发育的影响 [J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(54-60).
- [38] 张艳军, 胡选江, 刘佳, 等. 施氮量对烟后苦荞产量及植株养分吸收量的影响 [J]. 中国农学通报, 2021, 37(19-23).
- [39] 陈连珠, 杨小锋, 黄小燕, 等. 不同施氮量对黄秋葵生长、产量及品质的影响 [J]. 广东农业科学 2016, 43(77-81).
- [40] 唐仲霞, 银敏华, 齐广平, 等. 水氮耦合对无芒雀麦产量及氮磷钾化学计量特征的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(532-545).
- [41] 惠薇. 水氮耦合对藜麦生长、养分吸收及水氮利用的影响 [D]. 太原: 山西大学, 2021.

## **Influence of nitrogen application rate and upper and lower irrigation water limits on the productivity and nutrient uptake of okra (*Abelmoschus esculentus* L.)**

XU Sheng-hui<sup>1,2</sup> NIU Li<sup>2</sup> ZHANG Ren-lian<sup>2</sup> HUANG Yun-xiang<sup>1</sup>  
LONG Huai-yu<sup>2</sup>

(1. College of Resources and Environmental Science, Hunan Agricultural University Institute of Agricultural Resources; 2. Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences)

**Abstract:** A theoretical and parameter base for managing okra's water and fertilizer needs was provided by the examination of the interaction between the rate of nitrogen delivery and the upper and lower limits of irrigation water on the plant's ability to absorb nutrients. In this study, a soil pot experiment was conducted, and the upper and lower limits of 3 kinds of irrigation water were set, 45%~55% FC(W1), 35%~65% FC(W2), and 25%~75% FC(W3) and 3 nitrogen rates were 0, 110 kg hm<sup>-2</sup>, and 330 kg hm<sup>-2</sup>, respectively, denoted as N0, N1, and N2, to observe the impacts on okra's growth and development, physiological response, and nutritional uptake. The results showed that at the same N application level, different organ biomass, fruit yield, irrigation water productivity and NPK nutrient accumulation in okra were highest in W1. At the same upper and lower limits of irrigation, N1 was the highest in different organ biomass, fruit yield, glutamine synthetase activity, irrigation water productivity and nitrogen fertilizer bias productivity in okra, with significant differences among treatments. The total biomass, fruit yield, irrigation water productivity and nitrogen fertilizer bias productivity of okra were the highest in N1W1 treatment with 446.4g, 201.3g, 6.9g/kg and 108.7kg/kg, respectively, which were significantly higher than those of the N2W3 treatment (190.3g, 64.9g, 2.4g/kg and 11.7kg/kg, respectively), which increased by 57.4%, 67.8%, 65.2% and 89.2%, respectively. The thorough analysis revealed that high N and high water treatment (N2W3) significantly decreased okra yield and the effectiveness of using water and fertilizer. The ideal model for the integrated manifestation of okra yield, irrigation water productivity, and nutrient uptake was 110 kg hm<sup>-2</sup> N application and 45%~55% FC irrigation upper and lower limits (N1W1), and this study can offer a theoretical foundation for enhancing the high yield cultivation of okra.

**Key words:** okra; the upper and lower limits of irrigation water; nitrogen application rate; yield; nutrients