

DOI: 10.11686/cyxb2025241

http://cyxb.magtech.com.cn

杨雪琴, 李建平, 陈婧, 等. 降水变化对荒漠草原生态系统碳氮储量及固持速率的影响. 草业学报, 2026, 35(5): 48—60.

YANG Xue-qin, LI Jian-ping, CHEN Jing, *et al.* The impact of precipitation changes on carbon and nitrogen storage and retention rates in desert steppe ecosystems. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(5): 48—60.

降水变化对荒漠草原生态系统碳氮储量及固持速率的影响

杨雪琴¹, 李建平^{1,2,3*}, 陈婧¹, 连佳丽¹, 韩翠¹, 罗叙¹, 赵莹¹

(1. 宁夏大学林业与草业学院, 宁夏银川 750021; 2. 盐池北部荒漠草原宁夏野外科学观测研究站, 宁夏吴忠 751500; 3. 宁夏圣友德实业有限公司, 宁夏灵武 751400)

摘要: 作为陆地生态系统碳氮汇的重要贡献者, 草地生态系统在调节全球碳氮源、汇及其循环过程中具有重要作用。本研究以毛乌素沙地南缘宁夏盐池县温性荒漠草原为对象, 采用遮雨棚技术和人工补水措施, 模拟5个水平的降水梯度, 分别为自然降水量的33%、66%、100%、133%和166% (记为R₃₃、R₆₆、CK、R₁₃₃、R₁₆₆), 系统研究了2018—2024年不同降水梯度下植被—土壤碳氮储量及固持速率的变化规律。经过6年降水控制模拟试验, 结果表明: 1) 表层(0~10 cm)土壤碳氮储量受降水变化更敏感, 降水减少导致表层土壤碳氮储量随处理年限增加呈下降趋势; 降水增加使表层土壤碳氮储量呈上升趋势; 2) 降水增加时, 植被碳氮储量随处理年限的增加显著上升; 3) 增水处理下, 植被碳储量占草地生态系统碳储量的比重随时间增加呈上升趋势, 2024年达到最大占比; 随着降水量的减少和处理年限的增加, 草地生态系统碳氮流失加剧, 降水增加使草地生态系统碳氮固持速率呈上升趋势。因此, 降水增加有助于植被—土壤生态系统碳氮储量增加及固持速率提高, 降水减少导致碳氮流失加剧, 研究结果为深入理解草地生态系统碳氮循环过程中的关键环节对降水变化的响应规律提供了参考。

关键词: 荒漠草原; 降水梯度; 碳、氮储量; 碳、氮固持速率

The impact of precipitation changes on carbon and nitrogen storage and retention rates in desert steppe ecosystems

YANG Xue-qin¹, LI Jian-ping^{1,2,3*}, CHEN Jing¹, LIAN Jia-li¹, HAN Cui¹, LUO Xu¹, ZHAO Ying¹

1. School of Forestry and Grassland Science, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Northern Yanchi Desert Steppe Observation and Research Station of Ningxia, Wuzhong 751500, China; 3. Ningxia Shengyoude Industrial Co., Ltd., Lingwu 751400, China

Abstract: As an important contributor to carbon and nitrogen sinks in terrestrial ecosystems, grassland ecosystems play a crucial role in regulating global carbon and nitrogen sources, sinks, and cycling processes. This ongoing experiment is located on temperate desert grassland in Yanchi County, Ningxia, on the southern edge of the Mu Us Desert. The experiment treatments simulate five levels of precipitation using rain shelters and manual water replenishment (33%, 66%, 100%, 133%, and 166% of natural precipitation, coded as R₃₃, R₆₆, CK, R₁₃₃, R₁₆₆, respectively). Here we report changes in vegetation, soil carbon and nitrogen storage, and retention rates from 2018 to 2024 under the different precipitation regimes. After this six year period of precipitation control: 1) The carbon

收稿日期: 2025-06-19; 改回日期: 2025-08-19

基金项目: 宁夏自然科学基金项目(2023AAC03092)和国家自然科学基金项目(32160336)资助。

作者简介: 杨雪琴(1998—), 女, 宁夏固原人, 在读硕士。E-mail: 18295643570@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: lijianpingsas@nxu.edu.cn

and nitrogen storage of surface soil (0–10 cm) has responded more than at depth to changes in precipitation; decreased precipitation has led to a decrease in surface soil carbon and nitrogen storage with this effect increasing with the number of years. Conversely, increased precipitation has led to increased surface soil carbon and nitrogen storage. 2) Increased precipitation has led to increased, vegetation carbon and nitrogen storage and this effect has significantly increased over time. 3) Under water addition treatment, the proportion of vegetation carbon storage in the total carbon storage of the grassland ecosystem shows an upward trend over time, peaking in 2024; while the opposite (depletion) has occurred in the 33% and 66% precipitation regimes. Therefore, an increase in precipitation contributes to an increase in carbon and nitrogen storage and sequestration rates in vegetation and soil components of this ecosystem, while a decrease in precipitation exacerbates carbon and nitrogen loss. These research results provide quantitative data and enhance understanding of the response patterns of key links in the carbon and nitrogen cycling process of steppe ecosystems in response to precipitation change.

Key words: desert steppe; precipitation gradient; carbon and nitrogen storage; carbon and nitrogen sequestration rate

草地是世界上分布最广的植被类型之一^[1],也是我国陆地生态系统的主要类型,占国土面积的 40% 以上^[2],其中荒漠草原约占中国北部草原生态系统总面积的 39%^[3]。有机碳、全氮及其动态平衡是反映草地生态系统健康的重要指标^[4]。草地生态系统的碳储量约为 520 Pg,占全球陆地生态系统碳储量的 1/3,仅次于森林生态系统^[5],氮储量约占全球陆地生态系统的 10%^[6],但草地氮循环较快,因此草地生态系统在调节全球碳氮源、汇及其循环过程中具有重要作用。受气候变化影响,全球降水格局正发生着剧烈变化,极端干旱和降水事件更加频繁^[7]。降水量是影响干旱及半干旱地区生态系统稳定的重要因素,荒漠草原生态系统结构单一、稳定性差^[8],其碳氮循环对降水变化的敏感性高于其他草地类型^[9]。

植被及土壤碳氮储量是陆地生态系统碳氮循环研究中的重要参与者^[10],在全球气候变化背景下,国内外学者围绕陆地生态系统碳、氮储量已有大量研究^[10–13],多集中于对生态系统碳、氮含量及储量的研究,但在降水变化背景下围绕植被—土壤生态系统碳氮固持速率的研究相对较少。降水增加促进了草原生态系统碳积累^[14],增加了植被碳含量^[15];然而,也有研究认为,干旱导致土壤酶活性降低,进而降低有机碳分解速率,提高土壤有机碳含量^[16],植被碳氮含量随降水量的增加而降低^[17]。降水是土壤氮素循环关键步骤的重要驱动力^[18],降水量增加导致土壤氮含量增加^[19],但有研究表明,降水增加导致土壤氮库损失^[20]。目前,有关降水变化对草地生态系统碳氮储量的影响存在争议,降水对草地生态系统碳氮固持速率的影响尚不明确。本试验采用遮雨棚技术和人工补水方式模拟不同降水处理,研究了宁夏盐池县荒漠草原区域土壤碳、氮储量及固持速率对降水变化的响应,以期为北方荒漠草原植被—土壤碳氮储量及固持速率研究提供理论依据和数据参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于盐池北部荒漠草原宁夏野外科学观测研究站(37°47' N, 107°25' E, 平均海拔 1600 m)。属黄土丘陵向鄂尔多斯地台过渡带,典型荒漠草原类型,其生态系统脆弱。年平均气温 8.1 °C,年平均降水量为 282.3 mm,主要集中在 7–9 月,自东南向西北具有递减趋势,年蒸发量为 2132 mm,无霜期 162 d 左右,具有较好的光热条件和较高的光温生产潜力,属于典型的中温带大陆性气候带(表 1)。研究区土壤主要为灰钙土,质地为砂壤和粉砂壤,结构较松散,肥力低且保水保肥能力差。土壤 pH 偏高(约 8.8),土壤容重约为 1.80 g·cm⁻³,土壤含水量约为 4.4%。植被类型以旱生和中旱生为主,主要有蒙古冰草(*Agropyron mongolicum*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)和赖草(*Leymus secalinus*)等草本植物。

1.2 试验设计

采用单因素完全随机试验,基于研究区过去40年(1981—2020年)的平均降水量和降水极值(图1),于2018年布设试验,设定了5个水平的降水梯度,自然降水的33%、66%、100%、133%和166%,分别记为 R_{33} 、 R_{66} 、CK、 R_{133} 和 R_{166} ,采用遮雨棚和人工补水控制降水梯度,每个降水梯度设置3个重复,共设15个小区,每个小区面积为 $6\text{ m} \times 6\text{ m}$ 。对于减水处理(R_{33} 和 R_{66}),使用钢架结构和凹形长条透明塑料板,分别遮挡小区面积的 $2/3$ 和 $1/3$,同时收集遮挡雨水;对于增水处理(R_{133} 和 R_{166}),利用洒水壶将收集的雨水,在降水后的48 h内均匀洒到增水处理小区。在每个小区四周使用1.1 m宽的塑料板,防止水分扩散,距离地表1.0 m处进行埋藏,预留出10 cm防止地表径流,各小区间设计至少5 m宽的缓冲区(图2)。

1.3 样品采集与分析

分别于2018、2021和2024年的8月,采集土壤和植物样品。土壤样品:采用5点取样法,每块样地随机选取5个点,使用口径为6 cm的土钻分3层取样,每10 cm为1层(0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm)依次取样,同一土层5个采样点的土壤混合装在自封袋中,并标记样地编号带回实验室,共计45个土壤样品。其次,去除土壤中残余的枯落物及混杂物后,待其自然风干过2 mm筛,用于测定土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)和全氮(soil total nitrogen, STN)含量。在每块样地用铁锹挖出一个土壤剖面,用环刀法^[21]分别取0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm的土壤,用于测定土壤容重(bulk density, BD),共计45个。植物样品:每块样地随机选取一个 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的样方,将样方内的所有植物齐平地剪下地上部分,装入纸袋带回实验室,植物新鲜样品置于 $65\text{ }^\circ\text{C}$ 的烘箱内烘干至恒重,称重获取地上生物量,烘干后的植物磨样后进行植被地上部分碳、氮含量的测定;挖取样方内0~30 cm的根系,将其装于尼龙网袋冲洗干净后,于 $65\text{ }^\circ\text{C}$ 的烘箱内烘干至恒重,称重获取地下部分生物量,烘干后的根系磨样后进行植被地下部分碳、氮含量的测定。碳含量采用重铬酸钾容量法测定;氮含量采用半微量凯氏蒸馏法测定^[21]。

1.4 数据处理

土壤有机碳储量(soil organic carbon stock, $\text{SOC}_s, \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)计算公式为^[22]:

$$\text{SOC}_s = \frac{BD \times \text{SOC} \times D}{10}$$

式中:BD为土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$);SOC为土壤有机碳含量(%);D为土层厚度(cm),由于样地土壤中几乎无砾石,所以式中略去砾石含量参数。

植被碳储量(vegetation biomass carbon stock, $\text{VBC}_s, \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)计算公式为^[23]:

$$\text{VBC}_s = C \times B$$

式中:C为植被碳含量(%);B为植被生物量($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)。

表1 2018—2024年宁夏盐池县年降水量

Table 1 Annual precipitation of Yanchi County, Ningxia from 2018 to 2024

年份 Year	降水量 Precipitation (mm)
2018	360.0
2019	323.1
2020	205.2
2021	226.0
2022	313.2
2023	264.1
2024	332.4

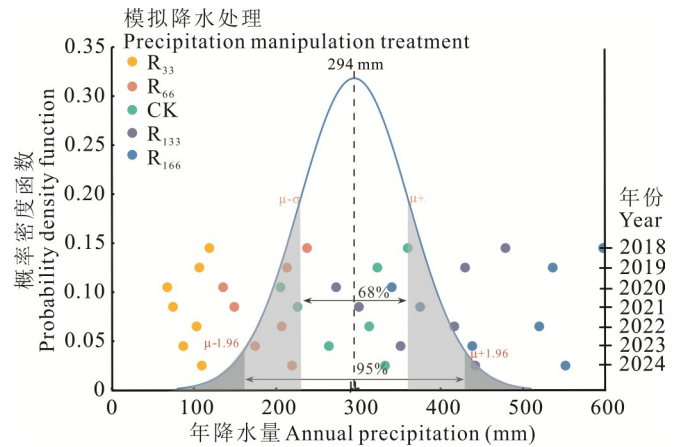


图1 荒漠草原40年间(1981—2020年)降水概率密度函数和2018—2024年模拟降水处理变化

Fig. 1 Estimated probability density function of precipitation in desert steppe for 40 years (1981–2020) and the precipitation manipulation induced statistical changes in precipitation treatment in 2018–2024

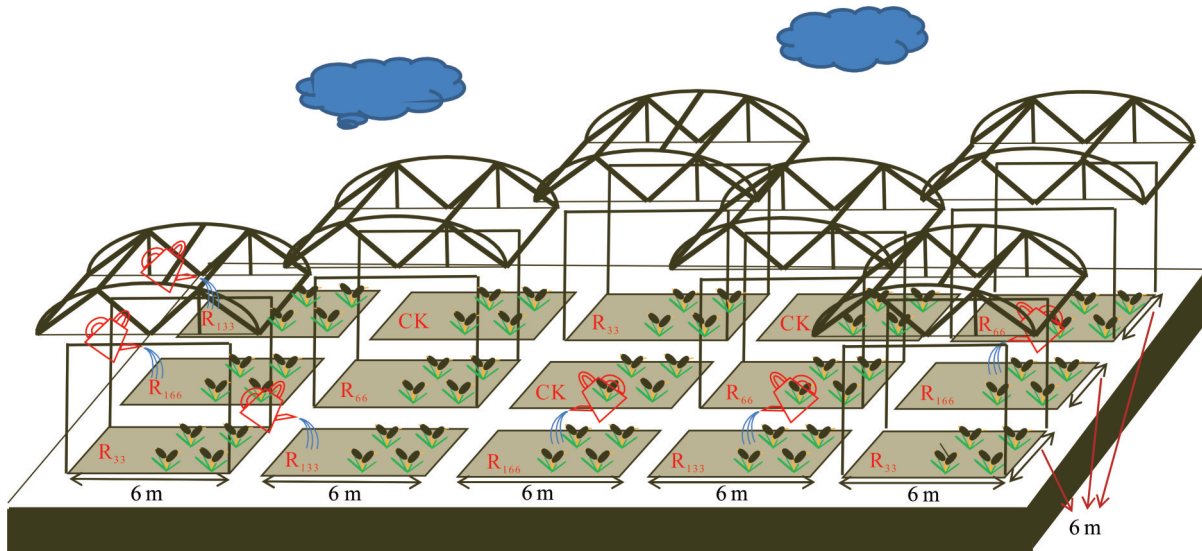


图 2 试验区设置

Fig. 2 Experimental area setting

生态系统碳储量(ecosystem carbon stock, ECS, $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)计算公式为^[13]:

$$ECS = VBC_{sa} + VBC_{sb} + SOC_s$$

式中: VBC_{sa} 为植被地上部分碳储量($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$); VBC_{sb} 为植被地下部分碳储量($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)。

土壤有机碳固持速率(soil organic carbon sequestration rate, SOCSR, $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)计算公式为^[24]:

$$SOCSR = \frac{\Delta SOC}{\Delta t} = \frac{SOC_{t_2} - SOC_{t_1}}{t_2 - t_1}$$

式中: SOC_{t_1} 、 SOC_{t_2} 为两次测定的土壤有机碳储量($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$); t_1 、 t_2 为两次测量的时间(a)。

植被碳固持速率(vegetation carbon sequestration rate, VCSR, $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)计算公式为:

$$VCSR = \frac{\Delta VBC}{\Delta t} = \frac{VBC_{t_2} - VBC_{t_1}}{t_2 - t_1}$$

式中: VBC_{t_1} 、 VBC_{t_2} 为两次测定的植被碳储量($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)。

生态系统碳固持速率(ecosystem carbon sequestration rate, ECSR, $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)计算公式为:

$$ECSR = SOCSR + VCSR$$

土壤全氮储量(soil total nitrogen stock, STN_s)及固持速率(soil total nitrogen sequestration rate, $STNSR$)、植被氮储量(vegetation biomass nitrogen stock, VBN_s)及固持速率(vegetation nitrogen sequestration rate, $VNSR$)、生态系统氮储量(ecosystem nitrogen stock, ENS)及固持速率(ecosystem nitrogen sequestration rate, $ENSR$)参考上述公式,将有机碳变为全氮即可。采用 Excel 2019 软件对数据进行记录和整理,利用 Origin 2025 软件进行单因素(one-way ANOVA)方差统计分析和绘图,并采用最小显著性差异法(LSD)进行多重比较($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳、全氮储量及固持速率变化

R_{33} 处理下,0~10 cm 土层的 SOC 储量随处理年限的增加逐渐降低,2018 年的 SOC 储量显著高于 2021 和 2024 年($P < 0.05$);在 10~20 cm 土层中,2024 年 SOC 储量显著低于 2018 和 2021 年($P < 0.001$);在 20~30 cm 土层中, SOC 储量随处理年限的增加逐渐降低但差异不显著($P > 0.05$,图 3a)。 R_{66} 处理下,在 0~10 cm 土层中,2018 年 SOC 储量显著高于 2024 年($P < 0.01$);10~20 cm 土层中, SOC 储量随处理年限增加呈显著下降趋势($P < 0.05$);在 20~30 cm 土层中,2024 年 SOC 储量显著低于 2018 和 2021 年($P < 0.05$,图 3b)。对照处理,各土层 SOC 储量随处理年限的增加无显著变化($P > 0.05$,图 3c)。 R_{133} 处理下,在 0~10 cm 土层中, SOC 储量随处理年

限的增加呈显著上升趋势($P < 0.05$);在10~20 cm土层中,2024年SOC储量显著高于2018和2021年($P < 0.01$);在20~30 cm土层中,2024年SOC储量显著高于2018年($P < 0.01$,图3d)。R₁₆₆处理下,在0~10 cm土层中,SOC储量随处理年限的增加呈显著上升趋势($P < 0.05$);在10~20 cm和20~30 cm土层中,2024年SOC储量显著高于2018和2021年($P < 0.05$,图3e)。

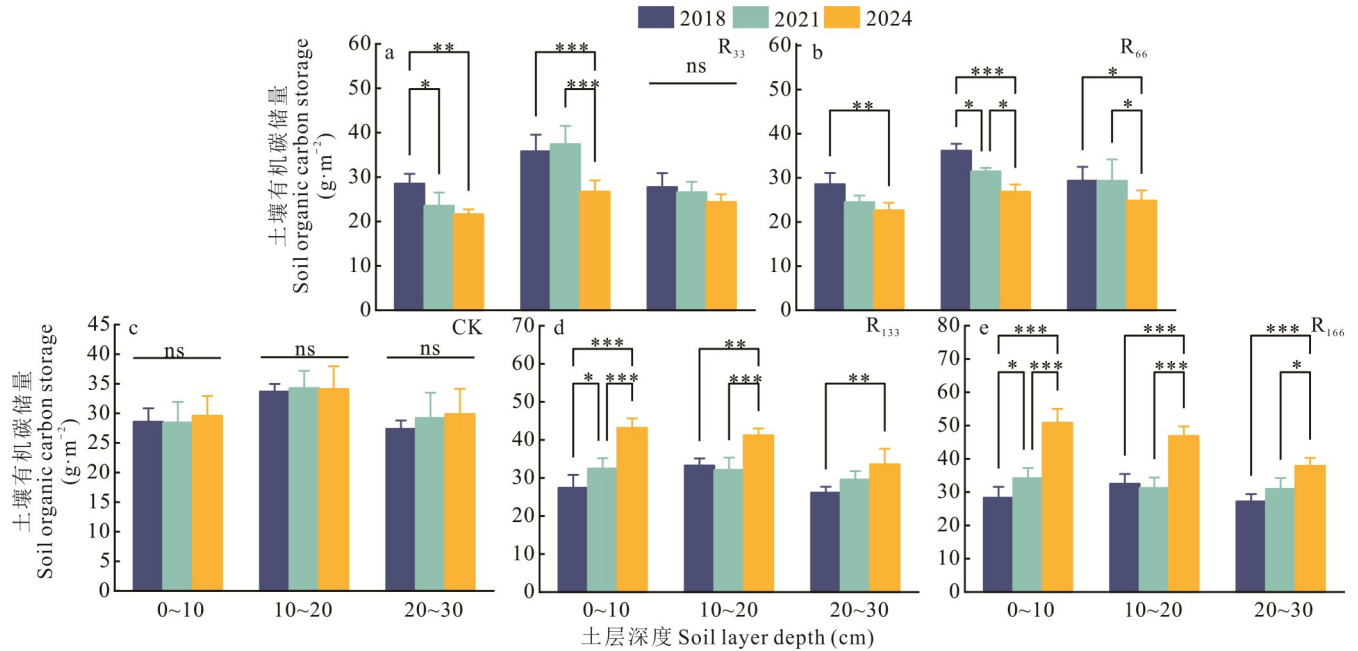


图3 降水变化对不同土层土壤有机碳储量的影响

Fig. 3 Impact of precipitation changes on soil organic carbon storage in different soil layers

*, **和***分别表示 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 和 $P < 0.001$, ns表示不显著。误差线表示标准误。下同。*, ** and *** indicate significant differences at 0.05, 0.01, and 0.001 levels, respectively, ns indicates not significant. The error line represents the standard error. The same below.

R₃₃处理下,0~10 cm土层中,STN储量随处理年限的增加呈显著下降趋势($P < 0.05$),10~20 cm土层中,2024年STN储量显著高于2018和2021年($P < 0.05$);20~30 cm土层中,STN储量随处理年限呈下降趋势,且2018年显著高于2024年($P < 0.05$,图4a)。R₆₆处理下,各土层STN含量均随处理年限增加呈逐渐下降趋势,且2018年显著高于2024年($P < 0.05$,图4b)。对照处理的0~10 cm和20~30 cm土层STN储量无显著差异($P > 0.05$),10~20 cm土层中,2024年STN储量显著低于2018和2021年($P < 0.01$,图4c)。R₁₃₃处理下,0~10 cm和10~20 cm土层中,STN储量随处理年限增加呈上升趋势,且2024年显著高于2018年($P < 0.05$);20~30 cm土层中,3年间STN储量未表现出显著变化($P > 0.05$,图4d)。R₁₆₆处理下,0~10 cm土层中,2018年STN储量显著低于2021和2024年($P < 0.05$),而10~20 cm和20~30 cm土层3年间均未表现出差异性变化($P > 0.05$,图4e)。

降水变化下,0~10 cm土层各降水梯度的SOC固持速率均表现为处理前期(2018—2021年)显著低于处理后期(2021—2024年)($P < 0.05$),表明减水处理前期土壤表层碳流失严重,处理后期碳流失有所缓解;而对照和增水处理下,随处理年限的增加,土壤表层SOC固持速率显著提升。20~30 cm土层中,各降水梯度下处理前期和后期的STN固持速率差异不显著($P > 0.05$),表明降水变化对该层土壤STN固持速率的影响较小。与对照(100%降水梯度)相比,长期(2018—2024年)降水减少,导致土壤持续干旱,使SOC固持速率和STN固持速率多为负值。正常降水和长期增水处理的SOC固持速率和STN固持速率以正值居多(表2)。

2.2 植被碳氮储量及固持速率变化

R₃₃处理下,植被地上碳储量随处理年限增加呈显著降低趋势($P < 0.05$);植被地下碳储量2024年显著低于2018和2021年($P < 0.001$);植被总体碳储量逐年降低,且2024年碳储量显著低于2018和2021年($P < 0.001$,图

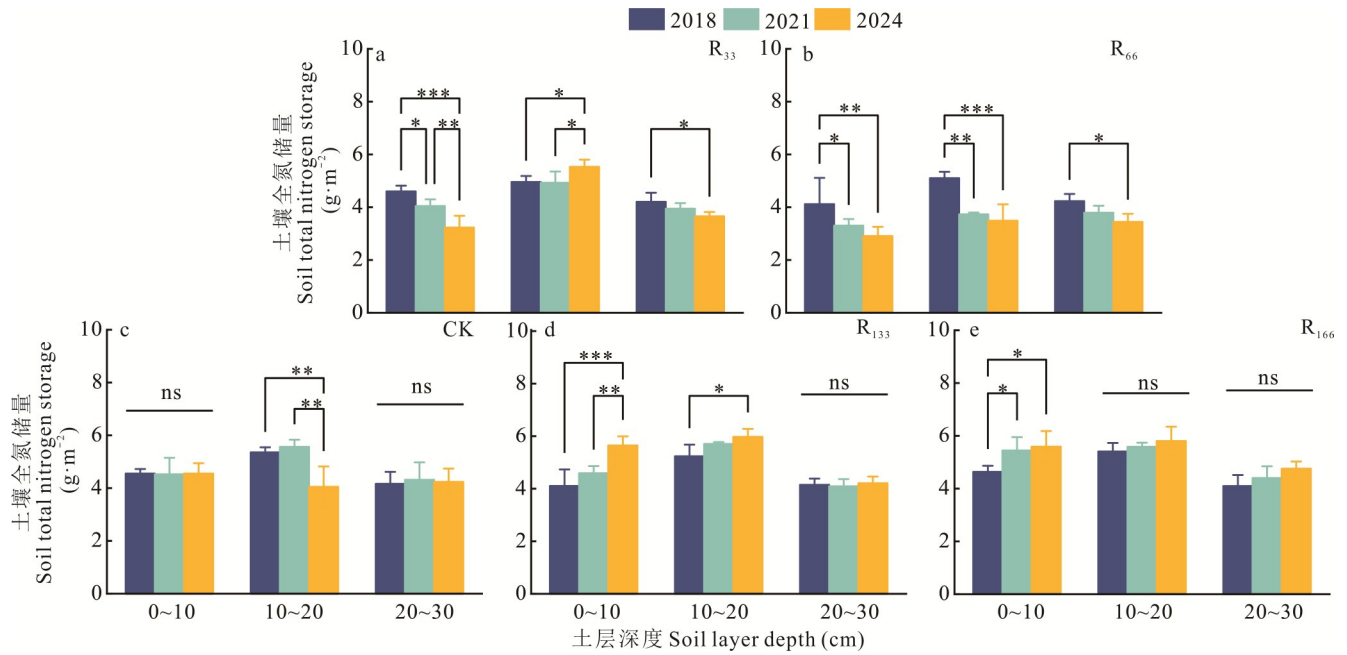


图 4 降水变化对不同土层土壤全氮储量的影响

Fig. 4 Impact of precipitation changes on soil total nitrogen storage in different soil layers

表 2 降水变化对土壤有机碳、全氮固持速率的影响

Table 2 Impact of precipitation changes on soil organic carbon and total nitrogen sequestration rates

降水梯度 Precipitation gradient	土层深度 Soil depth (cm)	土壤有机碳固持速率 Soil organic carbon sequestration rate ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)			土壤全氮固持速率 Soil total nitrogen sequestration rate ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)		
		2018–2021	2021–2024	2018–2024	2018–2021	2021–2024	2018–2024
R ₃₃	0~10	-1.66±0.03b	-0.64±0.06a	-1.15±0.02ab	-0.19±0.00a	-0.27±0.01a	-0.23±0.00a
	10~20	0.53±0.04a	-3.56±0.08c	-1.51±0.04b	0.03±0.00b	0.20±0.01a	0.10±0.00b
	20~30	-0.39±0.05a	-0.73±0.03a	-0.56±0.02a	-0.09±0.01a	-0.10±0.00a	-0.09±0.00a
R ₆₆	0~10	-1.36±0.04b	-0.61±0.02a	-0.99±0.03ab	-0.27±0.03a	-0.13±0.00a	-0.20±0.01a
	10~20	-1.56±0.04a	-1.54±0.03a	-1.55±0.02a	-0.46±0.01a	-0.18±0.01a	-0.27±0.01a
	20~30	0.01±0.06a	-1.49±0.09b	-0.75±0.02ab	-0.15±0.00a	-0.12±0.00a	-0.13±0.00a
CK	0~10	-0.26±0.02b	0.39±0.02a	0.17±0.02ab	-0.09±0.01b	0.07±0.00a	0.02±0.00ab
	10~20	0.48±0.04a	-0.05±0.04a	0.32±0.02a	0.07±0.01a	-0.50±0.02c	-0.22±0.01b
	20~30	1.11±0.06a	0.22±0.01a	0.65±0.04a	0.08±0.01a	-0.05±0.00a	0.02±0.00a
R ₁₃₃	0~10	1.69±0.03c	3.57±0.01a	2.63±0.02b	0.16±0.01b	0.35±0.01a	0.26±0.01ab
	10~20	-0.61±0.03c	3.02±0.05a	1.32±0.01b	0.16±0.01a	0.09±0.01a	0.12±0.00a
	20~30	1.16±0.02a	1.33±0.07a	1.24±0.05a	0.02±0.00a	0.04±0.01a	0.01±0.00a
R ₁₆₆	0~10	1.96±0.08c	5.56±0.05a	3.76±0.03b	0.27±0.01a	0.05±0.01b	0.16±0.01ab
	10~20	-0.79±0.07c	5.20±0.02a	2.39±0.03b	0.06±0.01a	0.14±0.01a	0.07±0.00a
	20~30	1.25±0.04b	2.32±0.04a	1.78±0.01ab	0.10±0.00a	0.12±0.01a	0.12±0.00a

表中数据为平均值±标准误差,下同。同行不同小写字母表示相同降水梯度下,同一土层中不同处理年份之间存在显著差异($P<0.05$)。The data in the Table are showed as mean value±standard error, the same below. Different lowercase letters in the same row for the same precipitation gradient indicate significant differences among different treatment years in the same soil layer ($P<0.05$).

5a)。R₆₆处理下,植被地上碳储量随处理年限增加呈显著降低趋势($P<0.05$);2021年植被地下碳储量显著高于2018和2024年($P<0.001$);植被总体碳储量于2021年最高,且显著高于2018和2024年,2018年也显著高于2024年($P<0.001$,图5b)。对照处理中,2018年的植被地上碳储量显著低于2021和2024年($P<0.05$);植被地

下碳储量呈逐年上升趋势,且2024年植被地下碳储量显著高于2018和2024年($P < 0.001$);植被总体碳储量随处理年限的增加呈显著上升趋势($P < 0.001$,图5c)。R₁₃₃处理下,植被地上碳储量、地下碳储量和植被总体碳储量随处理年限增加均呈上升趋势(图5d)。R₁₆₆处理下,植被地上碳储量、地下碳储量和植被总体碳储量随处理年限增加均呈显著上升趋势(图5e)。

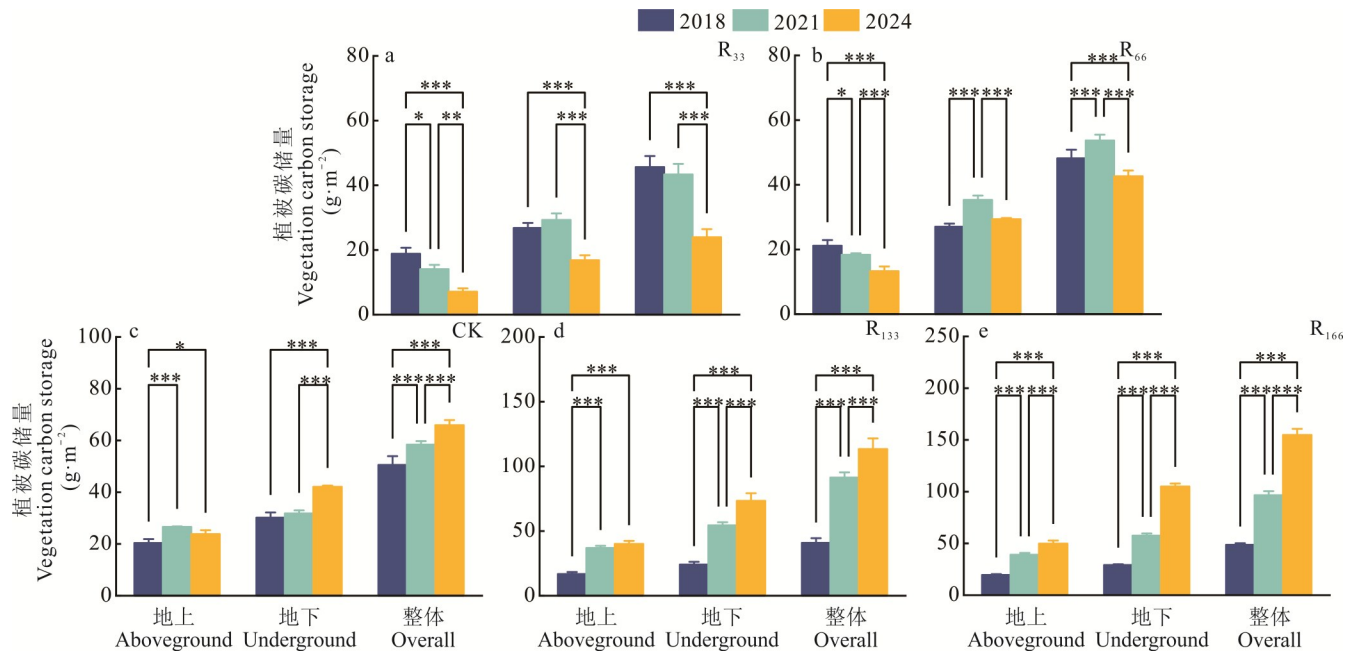


图5 降水变化对植被碳储量的影响

Fig. 5 Impact of precipitation changes on vegetation carbon storage

R₃₃处理下,植被地上氮储量、地下氮储量和植被总体氮储量呈逐年降低趋势,其中,2018年氮储量显著高于2021和2024年,2021年显著高于2024年($P < 0.05$,图6a)。R₆₆处理下,2021年的植被地上氮储量、地下氮储量和植被总体氮储量均显著高于2018和2024年($P < 0.01$),且2018年植被地上氮储量和植被总体氮储量显著高于2024年($P < 0.05$,图6b)。对照处理中,2024年植被地上氮储量、地下氮储量和植被总体氮储量均显著低于2018和2021年($P < 0.05$),且2021年的氮储量最高(图6c)。R₁₃₃处理下,2018年植被地上氮储量、地下氮储量和植被总体氮储量均显著低于2021和2024年($P < 0.001$),2021和2024年间的氮储量差异不显著($P > 0.05$,图6d)。R₁₆₆处理下,2018年植被地上氮储量显著低于2021和2024年($P < 0.001$);植被地下氮储量和植被总体氮储量随处理年限的增加呈显著上升趋势($P < 0.001$,图6e)。

增水处理下,处理前期的植被地上碳、氮固持速率均显著高于处理后期($P < 0.05$),表明与对照相比,随着处理年限的增加,降水量增加导致后期植被地上部分碳、氮固持速率明显降低。减水处理下,处理前期植被地下碳、氮固持速率均显著高于后期($P < 0.05$),且后期出现负值,表明随干旱年限增加,植被地下部分碳、氮固持量在处理后期显著降低($P < 0.05$)。从长期处理(2018—2024年)角度分析,植被地上和地下碳固持速率随降水量的增加呈上升趋势,表明降水对植被固碳有重要影响(表3)。

2.3 生态系统碳氮储量及固持速率变化

减水处理下,随着处理年限的增加,生态系统碳储量总体呈下降趋势,且土壤有机碳储量在生态系统碳储量中占比较大;植被地下部分碳储量的占比大于地上部分,且植被地上部分碳储量在生态系统碳储量中占比最小(图7a,b)。对照处理中,随着处理年限的增加,生态系统碳储量总体呈上升趋势,土壤碳储量在生态系统碳储量中占据优势,植被碳储量占比逐年增大(图7c)。增水处理下,生态系统碳储量随处理年限的增加呈上升趋势,植被碳储量占比逐年增大,植被地下碳储量占比大于地上部分(图7d,e)。

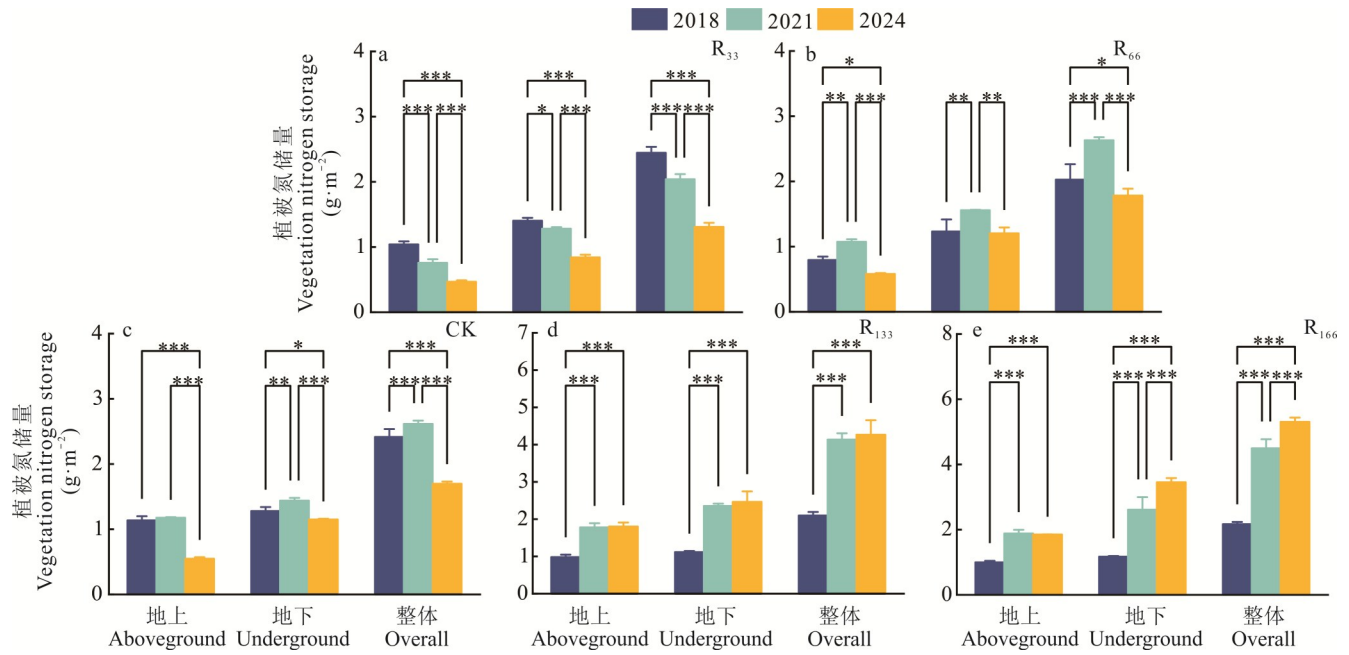


图 6 降水变化对植被氮储量的影响

Fig. 6 Impact of precipitation changes on vegetation nitrogen storage

表 3 降水变化对植被碳氮固持速率的影响

Table 3 Impact of precipitation changes on vegetation carbon and nitrogen sequestration rate

降水梯度 Precipitation gradient	部位 Compartment	植被碳固持速率 Vegetation carbon sequestration rate (g·m ⁻² ·a ⁻¹)			植被氮固持速率 Vegetation nitrogen sequestration rate (g·m ⁻² ·a ⁻¹)		
		2018—2021	2021—2024	2018—2024	2018—2021	2021—2024	2018—2024
R ₃₃	地上 Aboveground	-1.58±0.11a	-2.33±0.21b	-1.95±0.14ab	-0.09±0.00a	-0.10±0.01a	-0.10±0.00a
	地下 Underground	0.83±0.15a	-4.15±0.10c	-1.66±0.07b	-0.04±0.00a	-0.15±0.00c	-0.09±0.00b
R ₆₆	地上 Aboveground	-0.93±0.25a	-1.69±0.21b	-1.31±0.13ab	0.09±0.00a	-0.16±0.00c	-0.04±0.00b
	地下 Underground	2.77±0.10a	-1.99±0.19c	0.39±0.06b	0.11±0.03a	-0.12±0.02c	0.00±0.01b
CK	地上 Aboveground	2.08±0.26a	-0.93±0.25c	0.58±0.01b	0.01±0.01a	-0.21±0.00c	-0.10±0.00b
	地下 Underground	0.54±0.21c	3.43±0.13a	1.99±0.15b	0.05±0.00a	-0.10±0.01c	-0.02±0.00b
R ₁₃₃	地上 Aboveground	6.72±0.11a	1.02±0.24c	3.87±0.09b	0.27±0.01a	0.01±0.00c	0.14±0.00b
	地下 Underground	10.10±0.09a	6.30±0.70c	8.20±0.37b	0.41±0.01a	0.07±0.02c	0.22±0.02b
R ₁₆₆	地上 Aboveground	6.50±0.19a	3.59±0.22c	5.05±0.21b	0.30±0.01a	-0.03±0.01c	0.14±0.00b
	地下 Underground	9.48±0.26c	15.82±0.16a	12.65±0.21b	0.48±0.08a	0.28±0.10a	0.38±0.01a

同行不同小写字母表示相同降水梯度下,植被地上或地下部分不同处理年份之间存在显著差异($P < 0.05$)。The same row with different lowercase letters indicates significant differences ($P < 0.05$) among different years in the aboveground or underground parts of vegetation under the same precipitation gradient.

减水处理下,生态系统氮储量呈逐年下降趋势,2018年生态系统氮储量最高,2021年次之,2024年最低(图 8a,b)。对照处理中,2021年的生态系统氮储量最高,2024年明显下降(图 8c)。增水处理下,生态系统氮储量呈逐年上升趋势,植被地上部分氮储量在生态系统氮储量中所占比重最小(图 8d,e)。

33%、66%和133%降水处理下,处理前期生态系统碳固持速率显著大于后期($P < 0.05$);而正常降水处理下,处理前期生态系统碳固持速率大于后期,但差异不显著($P > 0.05$);166%降水梯度下,处理前期生态系统碳固持速率显著小于后期($P < 0.05$)。从长期处理角度来看,随降水量增加,生态系统碳固持速率呈上升趋势。减

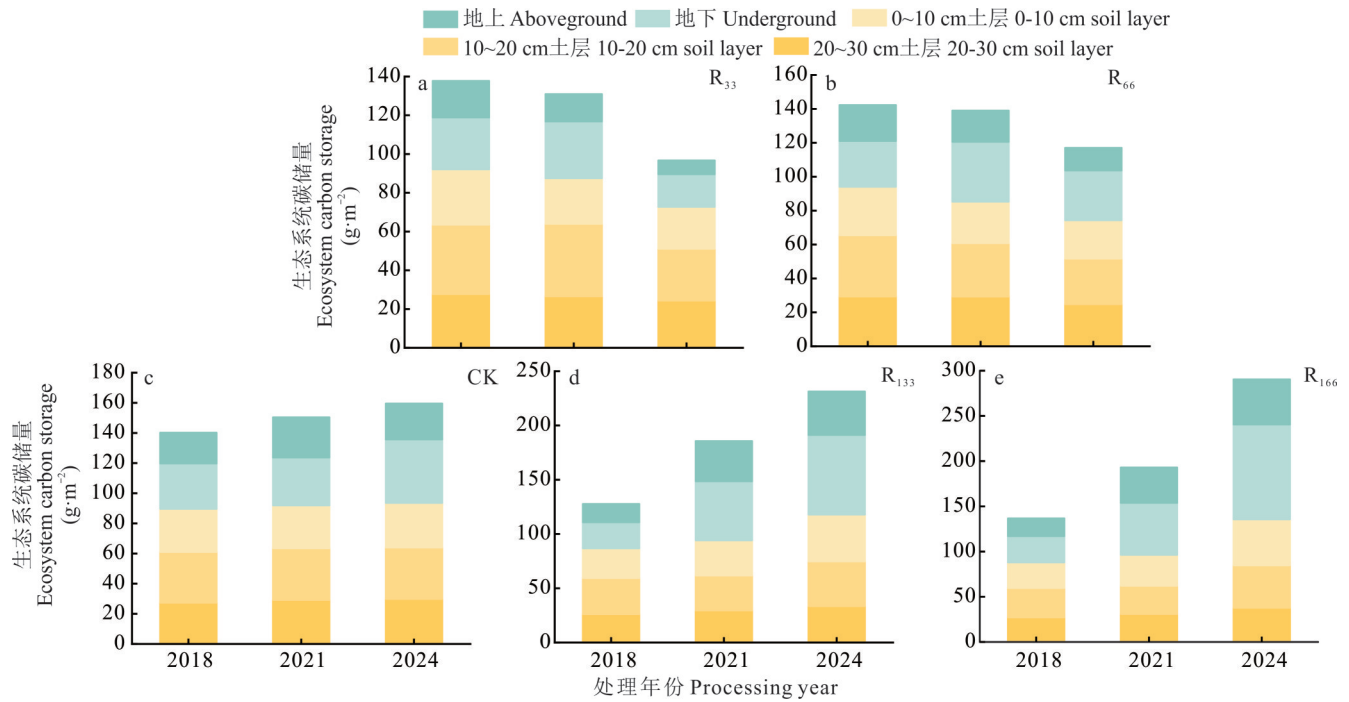


图7 降水变化对生态系统碳储量的影响

Fig. 7 Impact of precipitation changes on ecosystem carbon storage

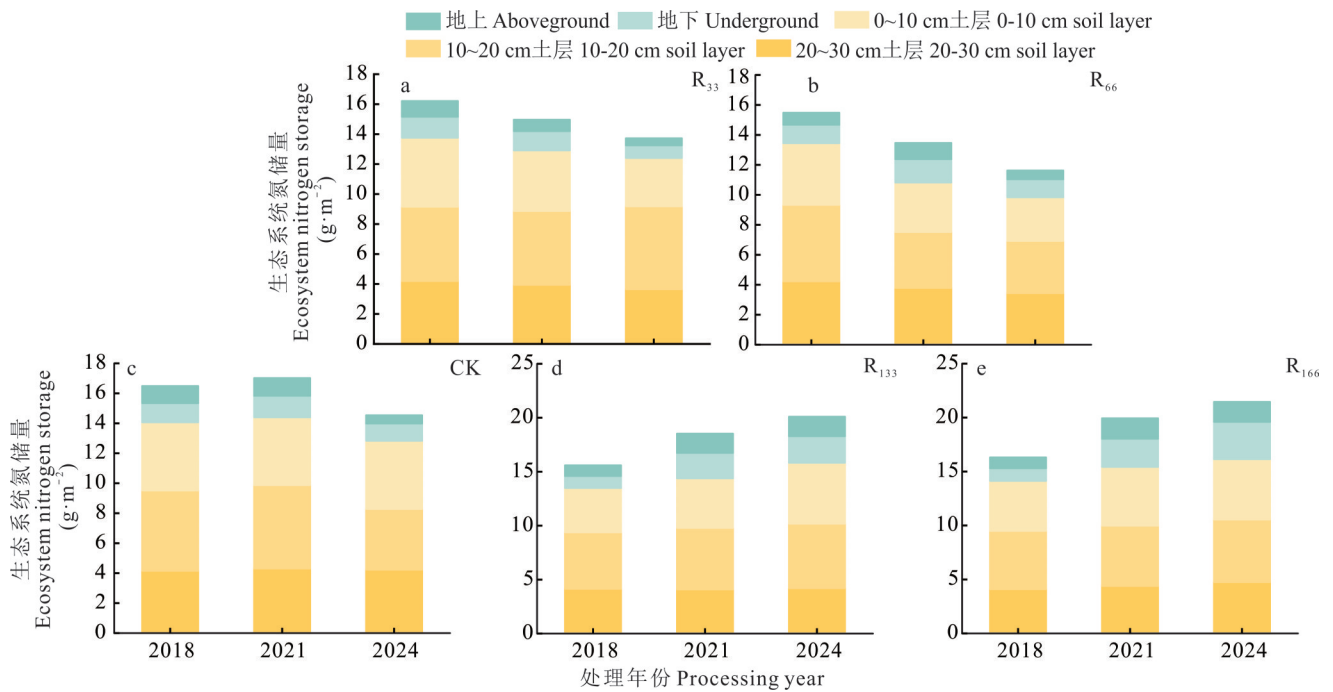


图8 降水变化对生态系统氮储量的影响

Fig. 8 Impact of precipitation changes on ecosystem nitrogen storage

水处理前期和后期的生态系统氮固持速率无显著差异($P > 0.05$);对照和增水处理前期生态系统氮固持速率均显著大于后期($P < 0.05$,表4)。

3 讨论

草地生态系统中90%的碳和氮储存于土壤中^[25],其中土壤有机碳和全氮占主导地位。本研究表明,通过对降水量的改变,土壤有机碳储量和土壤全氮储量均呈垂直分异,表层土壤对降水变化响应更为显著。与对照处理

表 4 降水变化对生态系统碳氮固持速率的影响

Table 4 Impact of precipitation changes on ecosystem carbon and nitrogen sequestration rate

降水梯度 Precipitation gradient	生态系统碳固持速率 Ecosystem carbon sequestration rate ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)			生态系统氮固持速率 Ecosystem nitrogen sequestration rate ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)		
	2018—2021	2021—2024	2018—2024	2018—2021	2021—2024	2018—2024
	R ₃₃	-2.31±0.37a	-11.40±1.70c	-6.84±0.74b	-0.39±0.03a	-0.41±0.02a
R ₆₆	-1.10±0.20a	-7.33±1.02c	-4.21±0.58b	-0.67±0.37a	-0.65±0.20a	-0.64±0.07a
CK	3.50±0.77a	3.05±0.46a	3.37±0.64a	0.13±0.15a	-0.80±0.13c	-0.31±0.11b
R ₁₃₃	19.26±0.47a	15.24±1.71b	17.26±1.03ab	1.01±0.21a	0.57±0.13b	0.75±0.03ab
R ₁₆₆	18.66±1.74c	32.48±0.78a	25.62±1.18b	1.21±0.06a	0.51±0.23c	0.86±0.09b

同行不同小写字母表示相同降水梯度下,不同处理年份之间存在显著差异($P<0.05$)。Different lowercase letters within the same row indicate significant differences among different treatment years under the same precipitation gradient ($P<0.05$).

相比,减水处理下土壤有机碳储量随处理年限的增加呈下降趋势。持续的干旱胁迫导致土壤水分降低,草地生产力下降,进而凋落物和根系分泌物输入减少^[26],碳输入量降低,草地生态系统碳库持续亏损,从而造成土壤有机碳储量呈下降趋势。该结果与陈庆美等^[27]的研究结果一致,但与刘彦春等^[10]在森林生态系统的研究结果不一致,其发现降水减少导致土壤碳储量增加。而表层土壤有机碳储量在降水量增加时,随处理年限的增加呈显著上升趋势,降水增多缓解荒漠草原的水分限制,促进植物进行光合作用,凋落物和根系分泌物输入量显著提高^[28],碳输入量提高,使土壤有机碳储量呈上升趋势。与对照处理相比,减水处理 0~10 cm 土层土壤全氮储量随时间增加呈下降趋势,干旱可能伴随风蚀或水蚀,导致表层富氮土壤流失^[29]。增水处理表层土壤全氮储量随处理年限的增加呈上升趋势,而深层土壤变化不显著,可能是由于深层土壤氧气和有机质较少,微生物活性低,氮转化速率变化不显著^[30]。伴随处理年限的增加,降水减少导致土壤持续干旱,土壤有机碳固持速率和土壤全氮固持速率均为负值,系统表现为碳氮“源”,处于碳氮流失状态。造成这一现象的可能原因是,干旱胁迫下,植物生产能力下降,凋落物输入减少,加速土壤原有碳氮分解^[31]。经过 6 年的干旱处理,减水 66% 处理的表层土壤碳氮流失速度 ($-1.15, -0.23 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) 小于减水 33% 处理 ($-0.99, -0.20 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$),表明降水减少明显加速了土壤碳氮流失,土壤碳氮固持能力明显降低。这与白柳等^[32]和吴旭东等^[33]在荒漠草原的研究结果一致,即干旱加剧碳氮流失。降水增加,土壤有机碳固持速率和土壤全氮固持速率均为正值,系统表现为碳氮“汇”,土壤碳氮的积累能力增强。同时,增水 66% 处理 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm 土层土壤碳固持速率 ($3.76, 2.39, 1.78 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) 均大于增水 33% 处理 ($2.63, 1.32, 1.24 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)。水分充足促进植物生长、凋落物和根系分泌物增加,提高了土壤碳氮输入,与赵玮等^[34]的研究结果相似。

植被碳氮通过凋落物和根系周转输入土壤,是土壤有机碳和全氮的主要来源^[35]。研究表明,植被地上碳储量在减水处理下随时间变化呈下降趋势,表明干旱加速植被地上部分碳流失。这与 Huang 等^[5]的研究结果一致,即干旱条件下植被碳储量显著降低。随着处理年限的增加,增水处理下的植被地上和地下碳氮储量均呈上升趋势,增水改善水分条件,促进植物光合作用,提高地上生物量,直接增加植被碳氮储量;增加细根周转和根系分泌物输入,间接增强碳氮积累^[36]。33% 降水梯度下,植被地上氮储量和地下氮储量随时间变化均呈显著下降趋势,与 Ren 等^[37]在内蒙古典型草原得出的结论相似。本研究表明,经过 6 年的控水模拟试验,植被地上和地下碳固持速率随降水量的增加呈上升趋势,且减水处理碳固持速率以负值居多,对照及增水处理则以正值占据优势,表明降水减少时,草地植被处于碳流失状态,且随降水量的减少碳流失加剧;降水增加时,草地植被固碳速率随降水量增加而上升。这与唐可欣等^[38]得出的结论相似。66% 降水梯度下,随着处理年限的增加,植被地上和地下氮固持速率在处理前期(2018—2021 年)为正值,而到处理后期(2021—2024 年)转变为负值,表明系统从氮汇转变为氮源。

本研究结果显示,毛乌素沙地草地生态系统的碳氮储量以土壤为核心,随降水量及处理年限增加,植被碳储

量占草地生态系统碳储量的比重逐渐变大,表明降水增加最直接缓解荒漠草原水分胁迫,促进植被进行光合作用,植被恢复在增加碳储量的同时会消耗土壤水分,可能导致土壤碳积累受限^[39]。降水减少,草地生态系统碳氮输出量增加,处于碳氮流失状态,随着处理时间的增加,碳氮流失加剧。这与李洋等^[40]的研究结果相似。降水增加,草地生态系统碳氮输入量增加,此时系统处于碳氮固持而非碳氮流失。

4 结论

荒漠草原持续6年的降水变化背景下,草地植被—土壤碳氮储量及固持速率深受降水量变化的调节。干旱胁迫使植被及表层土壤碳氮输入量降低,碳氮流失加剧,草地生态系统表现为碳氮源;而降水增加减缓干旱地区水分限制,有效促进了植被生物量增加,进而增加土壤碳氮输入量,碳氮固持速率上升,草地生态系统表现为碳氮汇。

参考文献 References:

- [1] Asner G P, Elmore A J, Oler L P, *et al.* Grazing systems, ecosystem responses, and global change. *Annual Review of Environment Resources*, 2004, 29: 261–299.
- [2] Ge Q S, Zhu H Y. Changes of the physical and human geographical environment in China during the past 2000 years. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(1): 3–14.
葛全胜, 朱会义. 两千年来中国自然与人文地理环境变迁及启示. *地理学报*, 2021, 76(1): 3–14.
- [3] Li G S, Harazono Y, Oikawa T, *et al.* Grassland desertification by grazing and the resulting micrometeorological changes in Inner Mongolia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 102: 125–137.
- [4] Yan R R, Xin X P, Wang X, *et al.* The change of soil carbon and nitrogen under different grazing gradients in Hulunber meadow steppe. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(6): 1587–1595.
闫瑞瑞, 辛晓平, 王旭, 等. 不同放牧梯度下呼伦贝尔草甸草原土壤碳氮变化及固碳效应. *生态学报*, 2014, 34(6): 1587–1595.
- [5] Huang Q D, Chen X, Shi M, *et al.* The spatial distribution and driving factors of carbon storage in the grassland ecosystems of the Northern Tibetan Plateau. *Journal of Resources and Ecology*, 2023, 14: 893–902.
- [6] Galloway N J, Dentener J F, Capone G D, *et al.* Nitrogen cycles: Past, present, and future. *Biogeochemistry*, 2004, 70: 153–226.
- [7] Shan Y R, Tian J H, Fan X W, *et al.* Spatial distribution of soil organic carbon components in mainland of China and their response to climate change. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2025, 36(3): 847–858.
单雅茹, 田嘉禾, 樊修稳, 等. 中国大陆土壤有机碳组分的空间分布及其对气候变化的响应. *应用生态学报*, 2025, 36(3): 847–858.
- [8] Nie M H, Shen Y, Lu Y, *et al.* Ecstoichiometric characteristics of dominant plant leaves-soil ecology in different communities of desert steppe in Yanchi County, Ningxia. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(1): 131–140.
聂明鹤, 沈艳, 陆颖, 等. 宁夏盐池县荒漠草原区不同群落优势植物叶片-土壤生态化学计量特征. *草地学报*, 2021, 29(1): 131–140.
- [9] Wu J X, Li S Y, Han G D. Linkage between soil stoichiometric imbalance and microbial carbon use efficiency in desert steppe under different grazing intensities. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(8): 2108–2118.
吴佳芯, 李邵宇, 韩国栋. 不同放牧强度下荒漠草原土壤化学计量失衡与微生物碳利用效率的联系. *应用生态学报*, 2024, 35(8): 2108–2118.
- [10] Liu Y C, Niu B L, Li Q L, *et al.* Review on the response of vegetation and soil carbon storage to decreased precipitation under simulation experiments in forests. *Terrestrial Ecosystem and Conservation*, 2023, 3(5): 82–87.
刘彦春, 牛保亮, 李青林, 等. 森林植被及土壤碳储量对降水减少响应的控制模拟实验研究进展. *陆地生态系统与保护学报*, 2023, 3(5): 82–87.
- [11] Cheng Y M, Ma H B, Ma J, *et al.* Effects of different grazing patterns on soil carbon and nitrogen storage and sequestration in desert steppe. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(10): 18–27.
程燕明, 马红彬, 马菁, 等. 不同放牧方式对荒漠草原土壤碳氮储量及固持的影响. *草业学报*, 2022, 31(10): 18–27.
- [12] Wang H Y, Dong Z, Guo J Y, *et al.* Organic carbon storage properties in *Stipa breviflora* desert steppe vegetation soil systems

- under different grazing intensities. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(15): 4617–4625.
- 王合云, 董智, 郭建英, 等. 不同放牧强度下短花针茅荒漠草原植被—土壤系统有机碳组分储量特征. *生态学报*, 2016, 36(15): 4617–4625.
- [13] Wang X S, He J, Ma P, *et al.* Responses of the vegetation community structure and carbon storage of temperate meadow steppe to salinization in Huihe Reserve. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(4): 1154–1162.
- 王雪松, 贺晶, 马普, 等. 辉河保护区温性草甸草原植被群落结构和碳储量对盐碱化的响应. *草地学报*, 2023, 31(4): 1154–1162.
- [14] Niu S L, Wu M Y, Han Y, *et al.* Water-mediated responses of ecosystem carbon fluxes to climatic change in a temperate steppe. *The New Phytologist*, 2008, 177: 209–219.
- [15] Su Z X, Su B Q, Shanguan Z P. Response characteristics of *Robinia pseudoacacia* leaf and soil ecological stoichiometric parameters to precipitation in the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(19): 7000–7008.
- 苏卓侠, 苏冰倩, 上官周平. 黄土高原刺槐叶片—土壤生态化学计量参数对降雨量的响应特征. *生态学报*, 2020, 40(19): 7000–7008.
- [16] Bastida F, López-Mondéjar R, Baldrian P, *et al.* When drought meets forest management: Effects on the soil microbial community of a Holm oak forest ecosystem. *Science of the Total Environment*, 2019, 662: 276–286.
- [17] Liang X Q, Li J P, Zhang Y, *et al.* Responses of vegetation and soil ecological stoichiometry to precipitation in desert steppe. *Pratacultural Science*, 2022, 39(5): 864–875.
- 梁晓谦, 李建平, 张翼, 等. 荒漠草原植被及土壤生态化学计量对降水的响应. *草业科学*, 2022, 39(5): 864–875.
- [18] Lupon A, Gerber S, Sabater F, *et al.* Climate response of the soil nitrogen cycle in three forest types of a headwater Mediterranean catchment. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2015, 120: 859–875.
- [19] Zhou X Q, Chen C R, Wang Y F, *et al.* Soil extractable carbon and nitrogen, microbial biomass and microbial metabolic activity in response to warming and increased precipitation in a semiarid Inner Mongolian grassland. *Geoderma*, 2013, 206: 24–31.
- [20] Lin L, Zhu B, Chen C R, *et al.* Precipitation overrides warming in mediating soil nitrogen pools in an alpine grassland ecosystem on the Tibetan Plateau. *Scientific Reports*, 2016, 6: 31438.
- [21] Bao S D. Soil agrochemical analysis (third edition). Beijing: China Agriculture Press, 1999: 30.
- 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 1999: 30.
- [22] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: A Meta analysis. *Global Change Biology*, 2002, 8: 345–360.
- [23] Deng L, Han Q S, Zhang C, *et al.* Above-ground and below-ground ecosystem biomass accumulation and carbon sequestration with *Caragana korshinskii* Kom plantation development. *Land Degradation & Development*, 2017, 28: 906–917.
- [24] Li J P, Chen J, Xie Y Z, *et al.* Dynamics of carbon storage and its sequestration rate in deeper soil layers following long-term fenced grasslands. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(6): 1–8.
- 李建平, 陈婧, 谢应忠, 等. 封育对草地深层土壤碳储量及其固持速率的影响. *水土保持研究*, 2016, 23(6): 1–8.
- [25] Wang Q Y, Liu M X, Wang M, *et al.* Analysis of soil carbon, nitrogen and phosphorus storage and sequestration effects in alpine grassland with different degradation levels in Maqu County, China. *Eurasian Soil Science*, 2024, 57: 794–805.
- [26] Huxman T E, Smith M D, Fay P A, *et al.* Convergence across biomes to a common rain-use efficiency. *Nature*, 2004, 429: 651–654.
- [27] Chen Q M, Wang S Q, Yu G R. Spatial characteristics of soil organic carbon and nitrogen in Inner Mongolia. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(5): 699–704.
- 陈庆美, 王绍强, 于贵瑞. 内蒙古自治区土壤有机碳、氮蓄积量的空间特征. *应用生态学报*, 2003, 14(5): 699–704.
- [28] Xin L, Jun S L, Jian W L, *et al.* Precipitation mediates the response of carbon cycle to rising temperature in the mid-to-high latitudes of the northern hemisphere. *PLoS One*, 2015, DOI: 10.1371/journal.pone.0132663.
- [29] Li R H, Li X B, Niu H P, *et al.* Distribution of soil nitrogen storage in the typical steppe of Inner Mongolia. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(11): 110–115.
- 李瑞华, 李晓兵, 牛海鹏, 等. 内蒙古典型草原区土壤氮储量分布研究. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(11): 110–115.
- [30] Yang X Q, Li J P, Lian J L, *et al.* Influence of precipitation change on the ecological stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus within desert steppe soil. *Chinese Journal of Grassland*, 2025, 47(3): 20–30.
- 杨雪琴, 李建平, 连佳丽, 等. 降水变化对荒漠草原土壤碳氮磷生态化学计量的影响. *中国草地学报*, 2025, 47(3): 20–30.

- [31] Cheng Z. Relationships between plant functional group diversity and soil carbon and nitrogen storages under different rainfall zones. Yangling: Northwest A&F University, 2021.
程真. 不同降雨带下草地植物功能群多样性与土壤碳氮储量关系研究. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [32] Bai L, Cui Y Y, Liu Z T, *et al.* Effects of simulated precipitation on the stoichiometric characteristics of carbon and nitrogen of dominant species in desert steppe. *Chinese Journal of Grassland*, 2023, 45(1): 23–32.
白柳, 崔媛媛, 刘倬彤, 等. 模拟降水对荒漠草原优势植物碳、氮化学计量特征的影响. *中国草地学报*, 2023, 45(1): 23–32.
- [33] Wu X D, Jiang Q, Ren X B, *et al.* Effects of precipitation on carbon, nitrogen and microbial characteristics of biological soil crusts in a desert steppe of Northern China. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(7): 34–43.
吴旭东, 蒋齐, 任小玢, 等. 降水水平对荒漠草原生物土壤结皮碳、氮和微生物的影响. *草业学报*, 2021, 30(7): 34–43.
- [34] Zhao W, Wang X X, Yang H T, *et al.* Spatio-temporal patterns of soil carbon and nitrogen characteristics along aridity gradients and their responses to climate change: Based on long-term field observation data of Chinese Ecosystem Research Network. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(9): 3582–3591.
赵玮, 王新兴, 杨昊天, 等. 土壤碳氮特征沿干旱梯度时空格局及对气候变化的响应——基于中国生态系统研究网络(CERN)长期定位监测数据. *生态学报*, 2023, 43(9): 3582–3591.
- [35] Wang B, Duan Y X, Wang W F, *et al.* Carbon and nitrogen storage and distribution patterns of desert ecosystems at different vegetation restoration stages in the eastern Hobq Desert. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(7): 2470–2480.
王博, 段玉玺, 王伟峰, 等. 库布齐东段不同植被恢复阶段荒漠生态系统碳氮储量及分配格局. *生态学报*, 2019, 39(7): 2470–2480.
- [36] Wang X, Zhong Z K, Wang J Y, *et al.* Responses of soil carbon pool of abandoned grassland on the Loess Plateau to two-years warming and increased precipitation. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(2): 523–534.
王兴, 钟泽坤, 王佳懿, 等. 黄土高原撂荒草地土壤碳库对两年增温增雨的响应. *土壤学报*, 2023, 60(2): 523–534.
- [37] Ren H Y, Xu Z W, Isbell F, *et al.* Exacerbated nitrogen limitation ends transient stimulation of grassland productivity by increased precipitation. *Ecological Monographs*, 2017, 87: 457–469.
- [38] Tang K X, Guo J B, He L, *et al.* Characteristics of the spatial and temporal evolution of gross primary productivity and its influencing factors in China's drylands. *Arid Zone Research*, 2024, 41(6): 964–973.
唐可欣, 郭建斌, 何亮, 等. 中国旱区GPP时空演变特征及影响因素研究. *干旱区研究*, 2024, 41(6): 964–973.
- [39] Meng Z Y, Liu J N, Cao L G, *et al.* Trade-off between soil carbon and water following revegetation across climatic gradients on the Loess Plateau. *Catena*, 2025, DOI: 10.1016/J.CATENA.2025.109071.
- [40] Li Y, Wang Y, Han G D, *et al.* Soil microbial biomass carbon and nitrogen levels and their controlling factors in alpine grassland, Qinghai–Tibet Plateau. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(6): 50–60.
李洋, 王毅, 韩国栋, 等. 青藏高原高寒草地土壤微生物量碳氮含量特征及其控制要素. *草业学报*, 2022, 31(6): 50–60.