

增强 UV-B 辐射对元阳梯田 2 个地方水稻品种 N 营养累积的影响

刘 畅¹, 何永美¹, 祖艳群¹, 李 元^{1*}, 唐有福²

(1. 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 2. 元阳县新街镇农业综合服务中心, 云南 红河 662416)

摘 要:在 2011 年,以元阳梯田 2 个地方水稻品种白脚老梗和月亮谷为研究对象,以自然光照和大田水稻原位种植为条件,进行模拟臭氧衰减(0、10%、20%、30%)导致 UV-B 辐射增强(0、2.5、5.0、7.5 kJ·m⁻²),研究 2 个地方水稻品种的 N 含量和累积量以及稻田土壤有效态 N 和全 N 含量对 UV-B 辐射增强的响应。结果表明:总体上 UV-B 辐射增强在 TR_{7.5}(UV-B 辐射增强 7.5 kJ·m⁻²)处理时显著降低 2 个水稻品种叶、茎、根和穗生物量,在 TR_{7.5} 处理时,水稻各部位生物量降到最小值。2 个地方水稻品种叶、茎、根和穗 N 含量影响基本一致,显著增加 2 个地方水稻品种各部位 N 含量。随着 UV-B 辐射增强白脚老梗各部位群体累积量有显著增加的趋势,而月亮谷各部位群体累积量随 UV-B 辐射增强表现出先升后降。UV-B 辐射增强促进两个水稻品种 N 营养输出,降低土壤碱解 N 和总 N 含量,导致土壤 N 库储量降低。

关键词:UV-B 辐射;元阳梯田;地方水稻品种;N;营养累积

中图分类号:Q945.7 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)08-1493-07 doi:10.11654/jaes.2013.08.001

Effects of Enhanced UV-B Radiation on N Accumulation of Two Traditional Rice Colonies in Yuanyang Terraces Under Field Conditions

LIU Chang¹, HE Yong-mei¹, ZU Yan-qun¹, LI Yuan^{1*}, TANG You-fu²

(1. College of Resource and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. Comprehensive Agricultural Service Center of Xinjie Town, Honghe 662416, China)

Abstract: In 2011, field experiments were conducted to understand the effects of enhanced UV-B radiation (2.5 kJ·m⁻², 5.0 kJ·m⁻² and 7.5 kJ·m⁻²) on available N and total N in paddy soil, contents and accumulation of nitrogen of traditional rice colonies—Baijiaolaojing (BJLJ) and Yuelianggu (YLG) in Yuanyang terraces. The results showed that: under enhanced UV-B radiation condition, the biomass of leaves, stems, roots and spikes of two traditional rice colonies decreased significantly, especially the lowest biomass under TR_{7.5} treatment. The contents of N in each part of two traditional rice colonies increased significantly. The accumulation of N in BJLJ increased significantly. The accumulation of N in YLG increased firstly with the greatest accumulation under TR_{5.0} treatment, and then decreased under TR_{7.5} treatment. In summary, the contents of soil available and total N contents under enhanced UV-B radiation decreased and the output of N from paddy soil of two traditional rice colonies increased, comparing with decrease in storage of N in paddy soil.

Keywords: UV-B radiation; Yuanyang terraces; traditional rice; nitrogen; nutrients accumulation

上世纪 70 年代以来,关于 UV-B 辐射增强对植物个体形态结构、生长发育、生理生化、膜系统、类黄酮含量影响的研究较多^[1-2],但大多仅限于室内短期的研究,而大田条件下长期增强 UV-B 辐射对植物的影

响具有累积效应^[3],使得室内个体水平的短期响应与野外条件下生态系统水平的长期响应具有明显差异,此外植物个体与植物群体对 UV-B 辐射增强的响应也存在差异。因此,大田条件下进行长期研究更能真实揭示 UV-B 辐射增强对植物群体的影响。目前已有较少关于野外条件下 UV-B 辐射对植物群体和自然生态系统水平的研究^[3-4]。UV-B 辐射增强对植物 N、P、K、Fe、Mg、Zn 等营养元素和营养累积影响的研究均有报道^[5-8],但研究结果不尽相同,这种差别可能与

收稿日期:2013-04-20

基金项目:国家自然科学基金(31060083,41205113)

作者简介:刘 畅(1987—),男,山东临沂人,在读硕士研究生,主要从事紫外辐射生态学研究。E-mail:490311676@qq.com

* 通信作者:李 元 E-mail:liyuan@ynau.edu.cn

植物种类、生育期、UV-B 辐射强度和其他环境条件的不同有关^[9],但大部分研究表明 UV-B 辐射增强降低植物对各种营养元素的累积。而高海拔高 UV-B 辐射背景下开展的在持久稳定农田生态系统中对传统水稻品种的 N 营养累积的研究未见报道。本研究在高海拔和高 UV-B 辐射背景条件下,利用当地具有 300 多年种植历史遗传稳定的农民自留品种为研究对象,在元阳梯田持久农田生态系统中进行原位种植,研究 UV-B 辐射对水稻 N 营养元素累积的影响,为正确评估持久稳定农田生态系统营养元素在高海拔和高 UV-B 辐射背景下对 UV-B 辐射的响应,探索 UV-B 辐射增强条件下持续稳定稻田生态系统生产力的营养调控提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验地点位于云南省元阳县新街镇元阳梯田,地处滇南低纬度哀牢山区,属山地季风气候,年平均温度 15℃,年降水量 1370 mm。供试水稻品种为当地自留品种白脚老粳(BJLJ)和月亮谷(YLG)。2 个水稻品种均为一年一熟,白脚老粳适合种植于海拔 1200~1600 m 的中亚热带气候梯田,为温性高秆农家水稻品种;月亮谷适合种植于海拔 1600~1800 m 的北亚热带梯田,属于耐寒的高秆农家水稻品种。2 个品种遗传基础稳定,品种不退化,株高一般在 150 cm 以上,最高可达 200 cm 以上,株型较散,分蘖力中等。在海拔 1600 m 的箐口村梯田种植白脚老粳,坡度为 26°,坡向北偏东 25°;在海拔 1800 m 的小水井村梯田种植月亮谷,坡度为 42°,坡向北偏东 55°。

2011 年 3 月 18 日播种,5 月 8 日移栽水稻秧苗至试验小区内。每个试验点共 12 个小区,每个小区面积为 3.0 m×1.5 m,每个小区种植 11×11 丛水稻,每丛 1 株秧苗。在整个水稻生长期所有田间管理方式与当地保持一致,两地各试验小区均未施加任何肥料,直至水稻收获。两试验地点土壤理化性质见表 1。

1.2 UV-B 辐射模拟

采用 40 W UV-B 灯管(波长 280~315 nm)对两个水稻品种进行增强 UV-B 辐射处理。试验设置辐射

梯度为 0(对照组:自然光照)、2.5、5.0、7.5 kJ·m⁻²·d⁻¹,相当于云南地区夏至晴天 0、10%、20%和 30%的臭氧衰减造成的 UV-B 的增量。试验小区每一行水稻上方都悬挂 UV-B 灯管,保证每行水稻受到相同 UV-B 辐射量。每个辐射梯度有 3 个平行,每个试验地点共有 12 个小区。每日辐照 7 h(上午 9:00 至下午 17:00),阴雨天除外,辐射处理至收获成熟。UV-B 辐射处理期间,利用 UV-B 测定仪测定水稻植株冠层上方各辐射梯度的 UV-B 强度来不断调整灯管的高度,调节灯高选择在傍晚无直接太阳光照时进行,避免自然光照对 UV-B 测定仪测定数据的影响,以保证每个小区接受规定剂量的 UV-B 辐射强度。对照小区每行植株上方只放置没有紫外灯的灯架,以保证处理组和对照组的自然光条件一致。

1.3 采样测定方法

在分蘖期、拔节期、孕穗期和成熟期,分别对 2 个水稻品种 4 个强度(0、2.5、5.0、7.5 kJ·m⁻²)UV-B 辐射处理的植物和土壤样品进行取样,每个实验小区收集 1 m² 整株水稻,用水洗法将植株洗净烘干制样;并将采集植株样品区域的土壤随机选择 5 个点(0~30 cm 土层)进行取样后混匀,土壤样品风干,过 0.25 mm 和 1 mm 筛,用于测定土壤总 N 和土壤碱解 N。

植物样品 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,总 N 测定采用凯氏定 N 法^[10]。元素累积量=元素含量×生物量^[11]。土壤总 N 测定采用凯氏定 N 法^[10],土壤碱解 N 采用碱解扩散法^[10]。

仪器设备:UV-B 灯管(北京双科实验仪器设备有限公司),凯氏定 N 仪(上海沛欧分析仪器有限公司),扩散皿等。

1.4 统计分析

使用 SPSS17.0 和 Excel 2003 对数据进行统计分析,并采用最小显著差异法(LSD)比较不同辐射强度下指标的差异性,显著水平定为 $P<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 UV-B 辐射对 2 个地方水稻品种生物量的影响

随着 UV-B 辐射处理增强,2 个地方水稻品种叶、茎、根和穗的生物量都有不同程度的下降。其中在

表 1 试验土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soils

水稻品种	总氮/g·kg ⁻¹	碱解氮/mg·kg ⁻¹	全磷/g·kg ⁻¹	速效磷/mg·kg ⁻¹	全钾/g·kg ⁻¹	速效钾/mg·kg ⁻¹	pH	有机质/g·kg ⁻¹
白脚老粳	1.76	78.44	0.45	15.26	16.20	16.52	5.32	26.80
月亮谷	2.37	62.50	0.65	17.03	18.65	17.21	5.25	28.40

TR_{7.5} 处理水平时,UV-B 辐射处理导致白脚老梗的茎、穗生物量显著降低,TR_{7.5} UV-B 辐射处理月亮谷茎和叶生物量显著降低。3 个强度的 UV-B 辐射处理月亮谷穗的生物量显著下降,TR_{5.0} 和 TR_{7.5} UV-B 辐射处理月亮谷地上部的生物量显著下降(表 2)。

2.2 UV-B 辐射对稻田土壤碱解 N 和总 N 含量的影响

2.2.1 UV-B 辐射对土壤碱解 N 含量的影响

表 3 表明,在 4 个生育期,随着 UV-B 辐射的增强白脚老梗土壤碱解 N 含量有降低的趋势。其中在 TR_{5.0} 和 TR_{7.5} 处理时,显著降低 4 个生育期白脚老梗土壤碱解 N 含量;在 TR_{2.5} 处理时,仅在分蘖期显著降低土壤碱解 N 含量;前 3 个生育期在 UV-B 强度增加到 TR_{7.5} 处理时,碱解 N 含量降低到最小值。月亮谷土壤碱解 N 含量随着 UV-B 辐射的增强在分蘖期、拔节期和成熟期表现出先降后升的趋势。其中在辐射处理为 TR_{5.0} 时,达到碱解 N 含量的最小值,此时碱解 N 含量分别显著低于对照 38.74%、54.63%和 57.10% ($P<0.05$);在孕穗期,UV-B 辐射处理为 TR_{2.5}、TR_{5.0} 和 TR_{7.5} 时,月亮谷土壤碱解 N 含量逐渐上升;在 TR_{2.5} 处理时,拔节期、孕穗期和成熟期土壤碱解 N 含量显著低于对照;在 TR_{5.0} 时,4 个生育期碱解 N 含量总体上降低最显著,而辐射强度为 TR_{7.5} 时,在分蘖期和成熟期,土壤碱解 N 含量显著小于对照组,在拔节期与孕穗期,与对照无显著差异。

2.2.2 UV-B 辐射对土壤总 N 含量的影响

如表 3 所示,在 4 个生育期,随着 UV-B 辐射的增强白脚老梗土壤总 N 含量逐渐降低,3 个辐射处理 TR_{2.5}、TR_{5.0} 和 TR_{7.5}, 土壤总 N 含量均显著低于对照。月亮谷土壤总 N 含量随着 UV-B 辐射的增强表现出先降低而后上升的趋势;在 TR_{5.0} 时,4 个生育期土壤总 N 含量降低到最小值并且显著低于对照;而在 TR_{7.5} 时,土壤总 N 又上升且与对照无显著差异;在 TR_{2.5} 处理时,孕穗期和成熟期土壤总 N 含量显著低于对照。

2.3 UV-B 辐射对 2 个地方水稻品种 N 含量的影响

2.3.1 UV-B 辐射对白脚老梗各部位 N 含量的影响

表 4 表明,4 个生育期,白脚老梗叶、茎和穗中 N 含量变化表现一致,随着 UV-B 辐射的增强逐渐上升。3 个处理 TR_{2.5}、TR_{5.0} 和 TR_{7.5},叶、茎中 N 含量显著高于对照,穗中 N 含量仅在孕穗期显著高于对照,而在成熟期 TR_{7.5} 处理时显著高于对照;根中 N 含量在 4 个生育期 UV-B 辐射处理时变化趋势存在差异,拔节期和成熟期根中 N 含量随着 UV-B 辐射的增强逐渐上升,分蘖期则是先升后降再升的趋势,孕穗期无变化趋势。UV-B 辐射处理在拔节期显著增加根中 N 含量;在分蘖期和成熟期,TR_{2.5} 和 TR_{5.0} 时,与对照无显著差异;孕穗期,各 UV-B 辐射强度处理均与对照无显著差异。

表 2 UV-B 辐射增强对 2 个地方水稻品种各部位生物量的影响($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)

Table 2 Effects of enhanced UV-B radiation on biomass of difference parts of two traditional rice colonies($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)

部位	时期	白脚老梗				月亮谷			
		CK	TR _{2.5}	TR _{5.0}	TR _{7.5}	CK	TR _{2.5}	TR _{5.0}	TR _{7.5}
叶	分蘖期	275±23a	230±28b	227±21bc	196±18c	291±28a	258±21ab	221±22bc	208±19c
	拔节期	380±32a	324±25b	299±28bc	284±24c	384±42a	343±35ab	327±27b	318±26b
	孕穗期	396±42a	356±31ab	331±29bc	304±30c	402±32a	370±47ab	358±42b	342±38b
	成熟期	454±50a	427±31ab	420±26ab	388±38b	464±42a	398±60ab	384±51ab	357±26b
茎	分蘖期	92±12a	88±16ab	77±15b	58±8c	98±12a	82±14ab	78±18b	65±16bc
	拔节期	183±22a	163±15ab	146±18b	103±11c	195±20a	184±15a	169±23a	113±17b
	孕穗期	192±28a	174±19a	145±15b	128±15c	224±23a	199±15a	187±14ab	173±18b
	成熟期	220±28a	189±18ab	170±12ab	146±16b	263±23a	205±25ab	182±17ab	177±15b
根	分蘖期	73±15a	66±10a	59±11a	58±7a	83±13a	72±12ab	60±7b	54±9b
	拔节期	95±15a	89±9a	85±12ab	78±9b	111±23a	102±17a	92±21ab	81±12b
	孕穗期	127±12a	111±10a	103±14ab	90±10b	132±21a	117±19ab	111±15b	99±12b
	成熟期	132±24a	118±18ab	111±13ab	92±8b	142±20a	122±17ab	112±14b	104±17b
穗	孕穗期	79±12a	65±11ab	65±11ab	51±18b	92±17a	82±12a	73±15ab	59±18b
	成熟期	688±76a	627±47a	592±36ab	516±50b	567±52a	448±67b	407±54b	369±27b

注:CK 为自然光处理;TR_{2.5} 为 2.5 $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 的 UV-B 辐射处理;TR_{5.0} 为 5.0 $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 的 UV-B 辐射处理;TR_{7.5} 为 7.5 $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 的 UV-B 辐射处理。表中不同字母表示不同处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著,根据 LSD 检验($n=3$)。下同。

2.3.2 UV-B 辐射对月亮谷各部位 N 含量的影响

如表 4 所示,4 个生育期,月亮谷根、茎、叶和穗中 N 含量变化趋势总体一致,随着 UV-B 辐射的增强表现为先升后降的趋势,其中在 TR₅₀ 时,各部位 N 含量达到最大值,其后在 TR₇₅ 时,又出现降低。4 个生育期在 TR₇₅ 时,总体上显著降低叶中 N 含量;前 3 个生育期 TR₂₅ 和 TR₅₀ 时,总体上与对照无显著差异,而成熟期显著增加叶中 N 含量。整个生育期 TR₅₀ 时,总体显著增加茎中 N 含量,而在 TR₂₅ 和 TR₇₅ 时,总体上与对照无显著差异。在 TR₂₅ 和 TR₅₀ 时,显著增加根中 N 含量;在拔节期,仅在 TR₅₀ 辐射条件下,显著增加根中 N 含量。UV-B 辐射处理显著增加孕穗期和成熟期根中 N 含量。在 TR₂₅ 和 TR₅₀ 时,显著增加穗中 N 含量;在成熟期,TR₂₅ 和 TR₅₀ 时,显著增加

穗中 N 含量,TR₇₅ 时,显著降低穗中 N 含量。

2.4 UV-B 辐射对 2 个地方水稻品种各部位 N 群体累积的影响

2.4.1 UV-B 辐射对白脚老梗各部位 N 群体累积的影响

表 5 表明,UV-B 辐射增强条件下,4 个生育期,TR₇₅ 时白脚老梗叶 N 群体累积显著增加。分蘖期,在 TR₂₅ 和 TR₅₀ 时茎 N 群体累积量显著增加;拔节期,TR₅₀ 时茎 N 群体累积量显著增加;孕穗期和成熟期,TR₂₅ 时茎 N 群体累积量显著增加。UV-B 辐射增强处理,根 N 群体累积量与对照无显著差异。孕穗期,显著增加穗 N 群体累积量。

2.4.2 UV-B 辐射对月亮谷各部位 N 群体累积的影响

由表 5 可知,在 UV-B 辐射下,4 个生育期月亮谷叶、茎、根和穗中 N 累积变化的趋势并不完全一

表 3 UV-B 辐射对稻田土壤碱解 N 和总 N 含量的影响(g·kg⁻¹)

Table 3 Effects of UV-B radiation on available N contents and total N contents in paddy soil(g·kg⁻¹)

品种	生育期	总 N				碱解 N			
		CK	TR ₂₅	TR ₅₀	TR ₇₅	CK	TR ₂₅	TR ₅₀	TR ₇₅
白脚老梗	分蘖期	94.50±3.62a	68.25±3.71b	56.00±3.79c	42.00±2.79d	1.72±0.05a	1.66±0.05ab	1.61±0.06b	1.58±0.03b
	拔节期	73.52±0.33a	71.75±1.11ab	68.25±1.00b	56.00±0.84c	1.68±0.04a	1.58±0.06b	1.55±0.05b	1.42±0.07c
	孕穗期	82.25±1.10a	77.00±2.25ab	70.00±2.76b	70.00±3.24b	1.67±0.03a	1.52±0.05b	1.44±0.03c	1.31±0.02d
	成熟期	96.60±2.05a	93.30±1.72a	52.50±2.51b	56.00±2.04b	1.61±0.07a	1.44±0.09b	1.41±0.09b	1.22±0.03c
月亮谷	分蘖期	53.82±2.63a	48.04±2.58ab	32.97±1.33c	45.24±2.48b	2.34±0.02a	2.31±0.02a	2.21±0.04b	2.34±0.02a
	拔节期	71.20±1.85a	41.14±1.15b	32.30±2.86c	65.68±3.22a	2.27±0.03a	2.20±0.04a	1.87±0.08b	2.23±0.03a
	孕穗期	57.39±2.07a	31.77±1.77b	35.06±2.96b	55.66±4.05a	2.21±0.03a	2.11±0.02b	1.73±0.03c	2.16±0.01ab
	成熟期	70.98±1.29a	31.77±2.06b	30.45±1.39b	56.12±7.84b	2.08±0.03a	1.97±0.02b	1.67±0.03c	2.13±0.01a

表 4 UV-B 辐射对 2 个地方水稻品种各部位 N 含量的影响(%)

Table 4 Effects of UV-B radiation on contents of N in different parts of two traditional rice colonies(%)

部位	时期	白脚老梗				月亮谷			
		CK	TR ₂₅	TR ₅₀	TR ₇₅	CK	TR ₂₅	TR ₅₀	TR ₇₅
叶	分蘖期	0.79±0.02d	0.98±0.08c	1.33±0.05b	1.51±0.04a	1.67±0.07ab	1.72±0.06ab	1.76±0.05a	1.24±0.07c
	拔节期	0.61±0.03c	0.91±0.05b	0.98±0.06b	1.22±0.03a	1.51±0.09a	1.44±0.09ab	1.63±0.15a	1.27±0.04b
	孕穗期	0.33±0.04c	0.74±0.03b	0.81±0.05ab	0.94±0.04a	0.95±0.13a	0.82±0.08b	1.03±0.08a	0.75±0.08b
	成熟期	0.33±0.03c	0.42±0.04b	0.42±0.04b	0.56±0.05a	0.66±0.02d	0.82±0.01b	1.03±0.02a	0.77±0.01c
茎	分蘖期	0.46±0.03c	0.63±0.03b	0.81±0.03a	0.81±0.03a	1.63±0.01a	1.24±0.03b	1.10±0.04c	1.01±0.05c
	拔节期	0.25±0.02b	0.25±0.02b	0.46±0.03a	0.49±0.05a	0.72±0.02c	0.86±0.02b	1.24±0.03a	0.74±0.01c
	孕穗期	0.21±0.02b	0.32±0.04a	0.32±0.06a	0.39±0.05a	0.37±0.03b	0.43±0.02b	0.64±0.02a	0.45±0.03b
	成熟期	0.21±0.03b	0.32±0.03a	0.32±0.02a	0.36±0.03a	0.29±0.02b	0.32±0.01ab	0.43±0.04a	0.41±0.61ab
根	分蘖期	0.43±0.03b	0.49±0.02b	0.42±0.02b	0.63±0.05a	0.52±0.02c	0.62±0.01b	0.81±0.03a	0.55±0.02c
	拔节期	0.25±0.01c	0.32±0.07b	0.39±0.04ab	0.46±0.02a	0.29±0.02b	0.34±0.02b	0.45±0.04a	0.32±0.01b
	孕穗期	0.35±0.02a	0.35±0.01a	0.35±0.04a	0.35±0.02a	0.34±0.02b	0.47±0.11a	0.53±0.02a	0.45±0.01a
	成熟期	0.25±0.02b	0.32±0.01b	0.32±0.04b	0.35±0.02a	0.18±0.02c	0.35±0.0a	0.38±0.02a	0.26±0.01b
穗	孕穗期	0.35±0.03c	0.53±0.02b	0.56±0.03b	0.70±0.03a	0.57±0.02c	0.66±0.01b	0.76±0.02a	0.61±0.01c
	成熟期	0.74±0.04b	0.77±0.04b	0.91±0.10ab	1.10±0.03a	1.18±0.02b	1.27±0.01a	1.29±0.02a	1.07±0.01c

表 5 UV-B 辐射对 2 个地方水稻品种各部位 N 群体累积的影响($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)Table 5 Effects of UV-B radiation on accumulation of N in different parts of two traditional rice colonies($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)

部位	时期	白脚老梗				月亮谷			
		CK	TR ₂₅	TR ₅₀	TR ₇₅	CK	TR ₂₅	TR ₅₀	TR ₇₅
叶	分蘖期	2.17±0.04b	2.26±0.11b	3.02±0.07a	2.97±0.04a	4.86±0.12a	4.44±0.09b	3.90±0.07c	2.58±0.09d
	拔节期	2.31±0.08c	2.95±0.09b	2.93±0.11b	3.47±0.05a	5.80±0.20a	4.94±0.18b	5.34±0.29ab	4.03±0.07c
	孕穗期	1.31±0.09b	2.64±0.07a	2.68±0.09a	2.56±0.08a	3.82±0.30a	3.03±0.17bc	3.69±0.16ab	2.57±0.16c
	成熟期	1.50±0.07c	1.79±0.10b	1.76±0.07bc	2.17±0.10a	3.07±0.05c	3.26±0.02b	3.95±0.04a	2.76±0.01d
茎	分蘖期	0.43±0.02b	0.55±0.03a	0.62±0.02a	0.47±0.02b	1.59±0.01a	1.02±0.02b	0.85±0.03c	0.66±0.03d
	拔节期	0.46±0.04b	0.41±0.03b	0.67±0.03a	0.51±0.03b	1.40±0.04c	1.59±0.03b	2.09±0.06a	0.84±0.01d
	孕穗期	0.40±0.02b	0.56±0.04a	0.46±0.05ab	0.50±0.03ab	0.83±0.06b	0.66±0.04b	1.20±0.04a	0.80±0.05b
	成熟期	0.46±0.04b	0.60±0.04a	0.54±0.02ab	0.53±0.03ab	0.69±0.04a	0.66±0.01a	0.78±0.07a	0.72±0.11a
根	分蘖期	0.31±0.02ab	0.32±0.01a	0.25±0.01b	0.35±0.03a	0.43±0.02b	0.45±0.01ab	0.49±0.02a	0.30±0.01c
	拔节期	0.24±0.01a	0.29±0.06a	0.33±0.03a	0.34±0.02a	0.32±0.02bc	0.35±0.02ab	0.41±0.04a	0.26±0.01c
	孕穗期	0.44±0.05a	0.39±0.01a	0.36±0.04a	0.35±0.01a	0.45±0.03a	0.55±0.11a	0.58±0.02a	0.45±0.01a
	成熟期	0.33±0.02a	0.37±0.01a	0.32±0.04a	0.32±0.02a	0.25±0.02b	0.43±0.01a	0.43±0.02a	0.27±0.01b
穗	孕穗期	0.28±0.02b	0.35±0.01a	0.36±0.02a	0.36±0.02a	0.53±0.02a	0.54±0.01a	0.53±0.01a	0.36±0.00b
	成熟期	5.09±0.25a	4.90±0.26a	5.39±0.60a	5.68±0.16a	6.69±0.09b	5.69±0.04c	5.25±0.06d	7.05±0.06a
总和	分蘖期	2.91±0.02c	3.13±0.07b	3.88±0.07a	3.78±0.08a	7.53±0.23ab	6.87±0.19b	7.84±0.38a	5.13±0.07c
	拔节期	3.01±0.11c	3.64±0.18b	3.93±0.06ab	4.31±0.07a	5.62±0.27a	4.78±0.12b	6.01±0.11a	4.17±0.10c
	孕穗期	2.43±0.17b	3.93±0.12a	3.86±0.18a	3.77±0.07a	10.71±0.06a	10.03±0.69c	10.42±0.02b	10.81±0.11a
	成熟期	7.38±0.30b	7.67±0.37ab	8.01±0.67ab	8.70±0.06a	6.05±0.05c	6.94±0.05b	8.18±0.03a	5.89±0.06d

致,在前 3 个生育期,叶 N 群体累积量总体表现为显著降低,而在成熟期,TR₂₅ 和 TR₅₀ 时,叶 N 群体累积量显著增加。UV-B 辐射下,在分蘖期,茎 N 累积量显著降低,而在拔节期和孕穗期,表现出先增加后降低的趋势,其中在 TR₂₅ 和 TR₅₀ 时,茎 N 群体累积量显著增加。UV-B 辐射下,总体上根 N 群体累积量表现出随 UV-B 辐射增强先增加后降低的趋势,其中在分蘖期和拔节期,TR₅₀ 时,根 N 群体累积量显著增加;在孕穗期和成熟期,TR₂₅ 和 TR₅₀ 时,根 N 群体累积量显著增加。在孕穗期,TR₇₅ 处理时,穗 N 群体累积量显著降低;在成熟期,TR₂₅ 和 TR₅₀ 时,穗 N 群体累积量显著降低,而 TR₇₅ 处理时,穗 N 群体累积量显著增加。

2.4.3 UV-B 辐射对 2 个地方水稻品种各部位总和 N 群体累积的影响

表 5 表明,UV-B 辐射增强处理,总体上显著增加了白脚老梗在 4 个生育期各部位总和 N 群体累积量,并且随着 UV-B 辐射强度的增强各部位总和 N 群体累积量增大。4 个生育期,月亮谷各部位总和 N 群体累积量随着 UV-B 辐射的增强总体上表现为先升后降的趋势,其中在 TR₅₀ 时,分蘖期、拔节期和成熟期,各部位总和 N 群体累积量达到最大值,其后在 TR₇₅ 时,又出现降低。综合 2 个品种 N 群体累积对

UV-B 辐射增强处理的响应,表现为 UV-B 辐射促进白脚老梗和月亮谷对 N 的累积。

3 讨论

大田条件下模拟 UV-B 辐射增强对元阳梯田 2 个地方水稻品种 N 元素营养累积,结果观察到,2 个地方水稻品种白脚老梗和月亮谷叶、茎、根和穗生物量都有不同程度的下降,唐莉娜等^[12]和许莹等^[13]同样发现,UV-B 辐射增强抑制水稻生长,使株高变矮、分蘖数减少、叶面积和干物质量下降。

UV-B 辐射增强处理条件下,2 个地方水稻品种土壤碱解 N 和总 N 含量变化为,与自然光照对比,相同生育期内,在 UV-B 辐射处理条件下,2 个地方水稻品种土壤碱解 N 含量降低,白脚老梗土壤全 N 同样降低,而月亮谷土壤总 N 变化总体不显著。UV-B 辐射条件下,促进两个当地水稻品种群体 N 的输出,从而降低稻田土壤中碱解 N 和总 N 含量,导致土壤库 N 储量的减少。

本实验观察到 UV-B 辐射增强总体上显著增加白脚老梗在 4 个生育期各部位 N 含量。类似研究结果表明,增强 UV-B 辐射显著提高了土庄绣线菊叶片的 N 含量^[14],UV-B 辐射显著增加春小麦茎、根、穗的 N 含量^[5]。不同研究表明,UV-B 辐射抑制浮游生物 N

结合^[15-16],降低黑麦和大豆中N的吸收,或UV-B辐射不影响欧洲越橘(*Vaccinium myrtillus*)和欧石楠灌丛(*Calluna vulgaris*)^[17]叶片N含量,这种差异可能与植物的种类、生育期、UV-B辐射强弱和其他环境因素有关^[9]。此外,植物矿质营养含量对UV-B辐射的响应还是各种生理和营养代谢过程变化的结果^[9]。UV-B辐射增强主要影响N素代谢过程中的关键酶活性,大多数研究结果发现,UV-B辐射显著抑制大麦(*Hordeum Linn*)^[18]和生长4d的玉米(*Zea mays*)幼苗^[19]叶和根中硝酸还原酶活性。而其他研究发现UV-B辐射可能增强吸收N素的关键限速酶谷氨酰胺合成酶^[20], Saralabai等^[21]研究表明,UV-B辐射增强使菽麻(*Crotalaria juncea*)体内的硝酸还原酶活性增加。本试验所用水稻品种长期生长在高海拔和高UV-B辐射背景的地区,经长期自然选择和适应性^[22],可能表现出对一定剂量UV-B辐射的耐性,甚至UV-B辐射刺激植物并促进植物的生长和对N素的吸收。通过对试验品种生物量的研究,发现UV-B辐射对2个地方水稻品种根的生物量影响与对照无显著差异(表2),根是植物对营养元素吸收的最主要部位,根生物量的增加与植物吸收N素和植株各部位N素含量的增加有着必然联系。

UV-B辐射增强对月亮谷各部位N含量的影响存在辐射强度和生育期上的差异,在TR_{2.5}和TR_{5.0}处理时增加月亮谷各部位N含量而在TR_{7.5}处理时表现出降低或不影响月亮谷各部位N含量。这种结果的原因可能是月亮谷对UV-B辐射的响应存在某一阈值,即在小于特定UV-B辐射阈值下,促进水稻对N素的吸收,增加植株各部位N含量,而超过一定UV-B辐射阈值则表现为抑制。

总体上UV-B辐射增强显著增加白脚老梗各部位N群体累积量,显著增加月亮谷TR_{2.5}和TR_{5.0}处理下4个生育期各部位N群体累积,这与在烟草中的研究结果一致^[23]。UV-B辐射条件下,月亮谷不同部位N、P、K累积量和群体累积量变化差异的原因是其不同部位N、P、K含量和生物量共同作用的结果^[11]。野外环境的复杂性影响水稻营养元素的吸收和累积。

4 结论

总体上在UV-B辐射增强条件下,2个地方水稻品种4个生育期各部位N含量和群体累积量显著增加,从而降低稻田土壤碱解N和总N含量,促进水稻

群体N素营养输出,导致土壤N库储量降低。本文虽然从水稻N含量和N营养累积量上间接说明了UV-B辐射增强所带来的影响,但没能从N代谢的机制上进一步直接阐明,这是本文的不足,也是以后研究的方向。

参考文献:

- [1] Jenkins G I. Signal transduction in responses to UV-B radiation[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2009, 60: 407-431.
- [2] Wu J B, Guan D X, Feng H Y, et al. Research advances on the biological effects of elevated ultraviolet-B radiation on terrestrial plants[J]. *Journal of Forestry Research*, 2009, 20(4): 383-390.
- [3] Caldwell M M, Bornman J F, Ballare C L, et al. Terrestrial ecosystems, increased solar ultraviolet radiation, and interactions with other climate change factors[J]. *Photochemistry and Photobiology Science*, 2007, 6: 252-266.
- [4] Wookey P A, Aerts R, Bardgett R D, et al. Ecosystem feedbacks and cascade processes: Understanding their role in the responses of arctic and alpine ecosystems to environmental change[J]. *Global Change Biology*, 2008, 15(5): 1153-1172.
- [5] 李元,王勋陵. UV-B辐射增加对麦田生态系统N、P累积和循环的影响[J]. 农业环境保护, 2000, 19(3): 129-132.
LI Yuan, WANG Xun-ling. Effects of enhanced UV-B radiation on accumulation and cycling of nitrogen and phosphorus in plant tissues under wheat field ecosystem[J]. *Agro-environmental Protection*, 2000, 19(3): 129-132.
- [6] 李元,王勋陵. 田间增强UV-B辐射对麦田生态系统K营养和累积的影响[J]. 西北植物学报, 2001, 21(2): 313-317.
LI Yuan, WANG Xun-ling. Effects of enhanced UV-B radiation on nutrients and accumulation of K of wheat field ecosystem[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2001, 21(2): 313-317.
- [7] 李元,王勋陵,胡之德. 田间增强UV-B辐射对麦田生态系统Fe营养和累积的影响[J]. 环境科学, 2000, 21(2): 36-39.
LI Yuan, WANG Xun-ling, HU Zhi-de. Effects of enhanced UV-B radiation on nutrients and accumulation of Fe wheat field ecosystem[J]. *Environmental Science*, 2000, 21(2): 36-39.
- [8] 李元,王勋陵,胡之德. 增强的UV-B辐射对麦田生态系统Mg和Zn积累和循环的影响[J]. 生态学杂志, 2001, 20(1): 26-29.
LI Yuan, WANG Xun-ling, HU Zhi-de. Effects of enhanced UV-B radiation on accumulation and cycling of Mg and Zn of wheat field ecosystem[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2001, 20(1): 26-29.
- [9] Caldwell M M, Flint S D. Stratospheric ozone reduction, solar UV-B radiation and terrestrial ecosystem[J]. *Climate Change*, 1994, 27: 354-359.
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO Shi-dan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [11] 李元,王勋陵. UV-B辐射对田间春小麦生物量和产量的影响[J]. 农村生态环境, 1999, 15(2): 28-31.
LI Yuan, WANG Xun-ling. Effects of enhanced UV-B radiation on

- biomass accumulation and yield of spring wheat colonies and assessment under field conditions[J]. *Rural Eco-Environment*, 1999, 15(2): 28-31.
- [12] 许莹,殷红,毛晓燕. UV-B 辐射增加对水稻生长发育及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2006, 22(4): 411-414.
XU Ying, YIN Hong, MAO Xiao-yan. Studies on the effects of enhanced UV-B radiation on growth and production of rice[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(4): 411-414.
- [13] 唐莉娜, 林文雄, 吴杏春, 等. UV-B 辐射增强对水稻生长发育及其产量形成的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 13(10): 1278-1282.
TANG Li-na, LING Wen-xiong, WU Xing-chun, et al. Effects of enhanced ultraviolet-B radiation on growth development and yield formation in rice[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(10): 1278-1282.
- [14] 陈兰, 张守仁. 增强 UV-B 辐射对暖温带落叶阔叶林土庄绣线菊水分利用效率、气孔导度、叶 N 素含量及形态特性的影响[J]. 植物生态学报, 2006, 30(1): 47-57.
CHEN Lan, ZHANG Shou-ren. Effects of enhanced UV-B radiation on water use efficiency, stomatal conductance, leaf nitrogen content and morphological characteristics of *Spiraea pubescens* in a warm-temperate deciduous broad-leaf forest[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(1): 47-57.
- [15] Braune W, Dohler G. Impact of UV-B radiation on ^{15}N -ammonium and ^{15}N -nitrate uptake by *Haematococcus lacustris* (volocales): I. Different response of flagellates and aplanospores[J]. *Journal Plant Physiology*, 1994, 144(3): 38-44.
- [16] Tyagi R, Srinivas G, Vyas D, et al. Differential effect of ultraviolet-B radiation on certain metabolic processes in achromatically adapting *Nostoc*[J]. *Photochemistry Photobiology*, 1992, 55(3): 403-407.
- [17] Ernst W H O, Jos W M, Vande Staaij, et al. Reaction of savanna plants from Botswana on UV-B radiation[J]. *Plant Ecology*, 1997, 128: 162-170.
- [18] Ghisi R, Trentin A R, Masi A, et al. Carbon and nitrogen metabolism in barley plants exposed to UV-B radiation[J]. *Physiology Plant*, 2002, 116(2): 200-205.
- [19] Quaggiotti S, Trentin A R, Vecchia F D, et al. Response of maize (*Zea mays*) nitrate reductase to UV-B radiation[J]. *Plant Science*, 2004, 167: 107-116.
- [20] 牛传坡, 蒋静艳, 黄耀. UV-B 辐射强度变化对冬小麦碳氮代谢的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4): 1327-1332.
NIU Chuan-po, JIANG Jing-yan, HUANG Yao. Influence of increased UV-B radiation on C and N metabolism of winter wheat[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4): 1327-1332.
- [21] Saralabai V C, Vail Thamizhchel P, Santhagum K. Influence of UV-B radiation on fixation and assimilation of nitrogen in *Crotalaria juncea* Linn.[J]. *Plant Physiology*, 1989, 32: 65-67.
- [22] 王连喜, 肖薇, 王传海, 等. 南京和宁夏地区 UV-B 辐射增强对小麦影响的对比研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(1): 34-38.
WANG Lian-xi, XIAO Wei, WANG Chuan-hai, et al. Effects of enhanced UV-B radiation on wheat in Nanjing and Ningxia[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(1): 34-38.
- [23] 何成刚, 周冀衡, 杨志新, 等. 增强 UV-B 辐射对两个烤烟品种主要化学成分的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(6): 767-771.
HE Cheng-gang, ZHOU Ji-heng, YANG Zhi-xin, et al. Effects of enhanced UV-B radiation on basic chemical compositions of two flue-cured tobacco cultivars[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(6): 767-771.