文章编号:1000-7601(2022)01-0184-09 **doi**:10.7606/j.issn.1000-7601.2022.01.21

黄土丘陵区春小麦水分调控下植物—土壤碳氮磷化学计量学及其稳态性特征

谢明君[1],李　广[1],闫丽娟[2],袁建钰[1],刘帅楠[1],祁小平[1],常海刚[1]

(1.甘肃农业大学林学院,甘肃 兰州 730070;2. 甘肃农业大学农学院,甘肃 兰州 730070)

摘　要:为探究黄土丘陵区农田生态系统土壤养分限制及其循环规律,明确水分调控下春小麦叶片及根的内稳态特征,以 5 个灌水量处理(W_0、W_{50}、W_{100}、W_{150}、W_{200})下春小麦成熟期叶片、根和 0~40 cm 土层土壤为研究对象,测定不同灌水处理下春小麦植株叶片、根、土壤有机碳(OC)、全氮(TN)、全磷(TP)含量及其化学计量比,揭示春小麦叶片和根随土壤养分变化的稳态性特征。结果表明:不同灌水处理下春小麦土壤 OC、TN 含量均具有表聚性特征,且在 0~40 cm 土层含量均随灌水量增加呈现出先增加后降低的趋势,表现出 W_{150} 灌水量处理最高(1.757 g·kg^{-1}、0.165 g·kg^{-1}),而土壤 TP 在不同土层及灌水处理下较为稳定,适当灌水(W_{150})有助于提高作物根系 OC 含量,过度灌水(W_{200})会降低其含量;春小麦土壤、根、叶片化学计量比均值表现为:C∶N(9.56、12.92、15.086),C∶P(11.68、79.66、151.625),N∶P(1.264、7.577、11.903),其中土壤 C∶N 值在不同土层及灌水处理下较为稳定,同时春小麦叶片 C∶N、C∶P 值分别低于全球平均值(16.27、595),春小麦 N∶P 值叶片(11.903)、根(7.577)均小于 14(临界值);春小麦与土壤 C、N、P 及其化学计量比的关系中,叶片、根均具有比较稳定的内稳性。综上所述,春小麦主要受 N 限制,选择合适灌水处理有助于土壤养分的存留,利于作物生态系统的有效恢复。

关键词:春小麦;灌水量;土壤有机碳;全氮;全磷;化学计量比;内稳态

中图分类号:S512.1^{+}2　　**文献标志码**:A

Stoichiometry and steady-state characteristics of plant-soil carbon, nitrogen and phosphorus under water regulation of spring wheat in loess hilly region

XIE Mingjun[1], LI Guang[1], YAN Lijuan[2], YUAN Jianyu[1], LIU Shuainan[1], QI Xiaoping[1], CHANG Haigang[1],

(1. *College of forestry*, *Gansu Agricultural University*, *Lanzhou*, *Gansu* 730070, *China*;
2. *Agricultural College*, *Gansu Agricultural University*, *Lanzhou*, *Gansu* 730070, *China*)

Abstract: To explore the soil nutrient limitation and its circulation in the farmland ecosystem and clarify the homeostasis characteristics of spring wheat, the leaves, roots and soil of 0~40 cm in the mature stage of spring wheat were studied under 5 irrigation treatments (W_0, W_{50}, W_{100}, W_{150} and W_{200}) in loess hilly area. The contents and stoichiometric ratios of organic carbon (OC), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in spring wheat leaves, roots and soil under different irrigation treatments were measured to determine the steady-state characteristics of spring wheat leaves and roots with soil nutrients. The results showed that: (1) The contents of OC and TN in spring wheat soil under different irrigation treatments had the characteristics of surface aggregation and in 0~40 cm soil layer. The content increased first and then decreased with the increase of irrigation amount, and W_{150} irrigation amount was the highest (1.757 g·kg^{-1}, 0.165 g·kg^{-1}). The soil TP was relatively stable under soil layer and irrigation treatment. Our research also showed the proper irrigation (W_{150}) was helpful to increase the nutrient content of OC in crop roots. However excessive irrigation (W_{200}) reduced the nutrient content. (2) The average stoichiometric ratios of soil, roots, and leaves were: C∶N (9.56, 12.92, 15.086), C∶P (11.68, 79.66,

收稿日期:2021-04-06　　**修回日期**:2021-06-26

项目基金:甘肃省财政专项(GSCZZ-20160909);甘肃省重点人才项目(LRYCZ-2020-1);甘肃省重点研究发展计划项目(20YF8NA135)

作者简介:谢明君(1995-),女,甘肃陇西人,硕士研究生,研究方向为农地土壤环境化学。E-mail: 1793184186@qq.com

通信作者:李广 (1971-),男,内蒙古化德人,教授,博士,主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: lig@gsau.edu.cn

151.625), N∶P (1.264, 7.577, 11.903). The soil C∶N value was relatively stable under the soil layer and irrigation treatment. The C∶N and C∶P values of spring wheat leaves were lower than the global average (16.27, 595). The N∶P values of spring wheat leaves (11.903) and roots (7.577) were both less than 14 (critical value). (3) In the relationship between spring wheat and soil C, N, P and their stoichiometry, leaf and root had relatively stable internal stability.In conclusion, spring wheat plants were mainly limited by N, and the selection of appropriate irrigation treatment was conducive to the retention of crop soil nutrients and effective restoration of crop ecosystem.

Keywords: spring wheat; irrigation water; soil organic carbon; total nitrogen; total phosphorus; stoichiometric characteristics; homeostasis

生态化学计量学是探究以生态系统中能量、物质循环和生态化学元素以及质量环境元素的平衡关系,可为生态系统能量及其元素平衡提供创新点[1-2],同时碳(C)、氮(N)、磷(P)作为植物生长发育需要的基本元素,在生态系统养分循环过程中起到平衡及耦合的作用,对于调节和驱动生态系统的演替过程具有重要的作用[3-4],因此研究土壤 C、N、P 的平衡关系对于探索陆地生态系统养分循环和平衡规律具有重要意义[1,5]。而内稳态调节是指通过调节体内化学元素浓度及不同化学元素间的计量比例,进而维持内部化学成分的相对稳定并相互影响和驱动土壤内其他养分元素的循环和转化[5-6]。春小麦内稳态性能够综合反映在其所处的环境变化中保持自身内部化学组成相对稳定的能力[7],在阐明随外界环境变化春小麦内稳性特征变化规律上具有重要意义。

黄土高原丘陵沟壑区,土质疏松,易被流水侵蚀,地表植被和生态系统遭到严重破坏,是我国水土流失最严重的地区。同时,土壤养分流失导致土地生产力大幅下降,降低了叶片和根系养分与土壤之间的输入和周转,这个过程直接或间接地影响土壤 C、N、P 化学计量特征[1]。有研究表明,不同的水位梯度及 N、P 施肥处理,极大地影响到小麦土壤养分及作物各生育器官的生长状况,进而影响到该区域农田系统养分循环过程及其平衡特征[8-10]。目前,国内外学者对生态化学计量学的研究较多[11-13],主要集中于陆地生态系统植物[14]、植物体各器官[5]、作物土壤-植物[16]以及灌水梯度的控施[17]等方面的研究,而对植物-土壤 C、N、P 养分限制及其内稳态特征研究相对较少[18]。土壤是植物赖以生存的物质基础和重要的营养来源,能够协调植物根部对植株的固定作用,为植物根系生长提供良好的环境条件[19]。由于生物生存环境因素、养分供应情况、生长发育阶段等外界变化均会对植物叶片、根的养分元素计量比特征产生影响且植物叶片及根生长活动为土壤提供养分来源和转换驱动力,随不同水位梯度变化,植物(叶片、根)和土壤之间的养分循环也会随之发生改变。因此,将植物(叶片、根)-土壤作为连续体,探究生态系统植物叶片和根在不同灌水处理过程中随土壤 C、N、P 含量及其化学计量比变化的稳态性特征,对于阐明生态系统元素循环和相互耦合的变化规律,丰富陆地生态系统生态化学计量学理论具有重要意义[5]。

我国黄土高原旱作雨养农业区,春小麦(*Triticum aestivum*)是黄土丘陵沟壑区域主要的粮食作物之一,具有抗旱能力强、生长期短等优点[20]。由于不同的灌水方式农田生态系统养分平衡存在较大差异,导致旱作春小麦-土壤系统养分循环耦合关系及其稳定机制尚不明确[21]。本研究以黄土丘陵沟壑区不同灌水处理下(0、50、100、150、200 mm)的春小麦为研究对象,分析不同灌水处理下成熟期春小麦土壤、叶片、根 C、N、P 含量及化学计量比特征,明确不同灌水处理下春小麦-土壤养分循环限制及叶片和根随土壤养分变化产生的内稳态特征规律,有助于更深层次认识生态环境脆弱地区在不同水处理下养分循环规律和稳定性机制,进而为黄土高原半干旱区农作物的种植以及土壤与植物间养分平衡及内稳性关系提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于甘肃省定西市安定区安家坡村甘肃农业大学旱农综合试验站,属于典型的雨养农业区,平均海拔 2 000 m,大陆性季风气候显著,年均气温 6.4℃,≥0℃年积温 2 933.5℃,年蒸发量 1 531 mm,年均降水量为 391 mm,年均降水量分布不均且不稳定,年际变化大,干旱频发。年潜在蒸发量约为降水量的 4 倍,无霜期平均 140 d。土壤多为当地典型的黄绵土,土层深厚,土质绵软且质地均匀,蓄水性能良好[22]。研究区土壤容重为 1.26 $g \cdot cm^{-3}$,土壤有机碳 6.21 $g \cdot kg^{-1}$,土壤全氮 0.61 $g \cdot kg^{-1}$。

1.2　试验设计和采样

试验于 2017 年 3 月—2018 年 8 月在试验站开

展,采用随机区组设计,选择当地常种春小麦品种定西 42 号,样地面积为 24 m^2(长 6 m,宽 4 m),每块样地播种量为 187.5 kg·hm^{-2},播种行距为 25 cm。150 kg·hm^{-2}过磷酸二铵和 62.5 kg·hm^{-2}尿素作为基肥,于小麦播种前撒施[23]。

设 5 个灌水处理(0、50、100、150、200 mm),不同生育期具体灌水量见表 1,每个处理 3 个重复,共计 15 块样地,为减少样地之间的互相影响,各样地间设计约 0.5 m 宽的隔离带。在小麦成熟期,每块样地随机选取 3 个点,用土钻(直径为 5 cm) 采集 0~10、10~20、20~40 cm 土层土样,将同一样方内 3 个样点的土样混匀,过 0.25 mm 土筛后在阴凉处风干保存用于测定土壤养分。每个样方内选择长势良好的 5 株小麦,将叶片混合后装入自封袋,带回实验室用水洗去灰尘,表面风干后置 80℃烘干,粉碎后过 1 mm 筛测定叶片养分[23]。

表 1 春小麦不同生育期灌水处理

Table 1 Irrigation treatment in different growth stages of spring wheat

生育期 Growth stage	灌水量 Irrigation amount/mm				
	W_0	W_{50}	W_{100}	W_{150}	W_{200}
分蘖期 Tillering stage	0.00	16.67	33.33	50.00	66.66
拔节期 Jointing stage	0.00	16.67	33.33	50.00	66.66
开花期 Flowering stage	0.00	16.67	33.33	50.00	66.66
全生育期 Whole growth stage	0.00	50.00	100.00	150.00	200.00

1.3 土壤与植物样品分析

土壤、叶片和根 OC 含量均采用重铬酸钾-外加热法测定,TN 含量采用半微量凯氏定氮法进行测定(KDY-9830),TP 含量采用 H_2SO_4 - H_2O_2溶液消解,用钼酸铵比色法测定;用环刀法测定土壤容重;采样后将土壤样品置于-4℃冰箱保存,用铝盒烘干测土壤含水量[23-24]。

1.4 数据处理和统计分析

内稳态指数(Homeostasis index,H) 采用如下公式进行计算[25]:

$$\lg(y) = \lg(c) + \frac{\log(x)}{H}$$

式中,H 为内稳态指数,因变量(y)为叶片或根 C、N、P 含量或计量比,自变量(x)为对应的土壤 C、N、P 含量或计量比,c 为积分常数。按照 Persson 等[25]的分类,当方程拟合显著时,将 $H>4$、$2<H<4$、$1.33<H<2$、$H<1.3$ 分别划为稳态、弱稳态、弱敏感态和敏感态,但当方程拟合不显著时认为是绝对稳态。

采用单因素方差分析(One-way ANOVA)检验各指标不同处理间的差异,用 Duncan 法进行多重比较,显著性水平为 $P<0.05$。采用 Pearson 相关性分析土壤养分指标与叶片、根 C、N、P 化学计量学指标。通过 Excel 2010 软件制作图表。

2 结果与分析

2.1 春小麦不同灌水处理下植物—土壤 C、N、P 含量变化特征

不同灌水处理下春小麦土壤—植物(叶片、根)养分变化如图 1 所示。土壤 OC、TN 含量均在 0~10 cm 土层达到最高值,具有明显的表聚现象,且在 0~40 cm 土层,土壤 OC、TN 含量均为 W_{150}灌水处理下最大,土壤 OC 含量显著高出其余灌水处理 7.4%~22.8%,而土层及灌水处理双效应下,土壤 TP 含量均无显著差异。

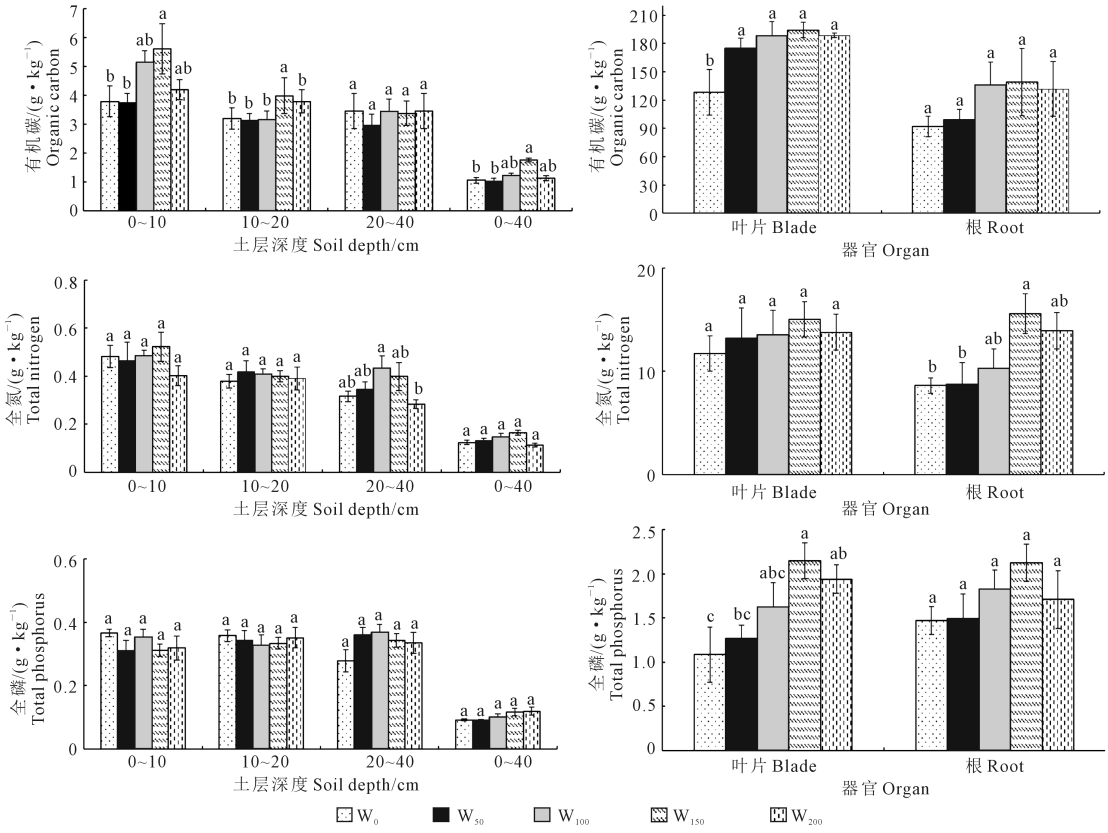
在不同灌水处理下,植物叶片、根 OC、TN、TP 含量均随灌水量升高呈先增加后降低的趋势,最大值均为 W_{150}灌水处理。具体表现为:OC(194.312、136.321 g·kg^{-1})、TN(15.021、15.574 g·kg^{-1})、TP(2.149、2.126 g·kg^{-1})(图 1),且 W_{150}处理下根 TN 及叶片 TP 含量分别显著高于 W_0、W_{50}处理,植物叶片 TN 及根 TP 含量在 5 种灌水处理下波动较小且无显著性差异。

2.2 春小麦不同灌水处理下植物—土壤各元素化学计量比特征

单因素方差分析表明(表 2),不同灌水处理下春小麦 0~40 cm 土层土壤、根、叶片表现为:C∶N(9.560、12.920、15.086)、C∶P(11.68、79.66、151.625)、N∶P(1.264、7.577、11.903),土壤 C∶N 值整体上随灌水量增加而增加,且土壤 C∶P 在 W_{150}处理下与其他灌水处理存在显著差异($P<0.05$),叶片 N∶P 在 W_0达到最大值,与其他灌水处理存在显著差异($P<0.05$),且在 W_0时 N∶P>16,说明叶片在 W_0时受 P 限制,在增加灌水时受 N 限制。

2.3 不同灌水处理对春小麦产量及总生物量的影响

由表 3 可知,当灌水处理为 W_{150}时春小麦产量、总生物量均达到最大值,且春小麦产量在 W_{150}处理下高出 W_0、W_{50}、W_{100}、W_{200}灌水处理 24.11%~83.46%($P<0.05$);春小麦总生物量 W_{150}处理与其他处理间均存在显著差异($P<0.05$)。



注:不同小写字母表示同一土层或植物器官不同灌水处理间差异显著($P<0.05$),下同。

Note: Different lowercase letters indicate that there are significant difference in the same soil layer or plant organs between treatments ($P<0.05$), the same below.

图 1　春小麦不同灌水处理下土壤-植物养分含量

Fig.1　Soil-plant nutrient content of spring wheat under different irrigation treatments

表 2　春小麦不同灌水处理下 0~40 cm 土层土壤-植物 C∶N∶P 化学计量特征

Table 2　Stoichiometric characteristics of C∶N∶P in 0~40 cm soil-plant under different irrigation treatments of spring wheat

指标 Index		灌水处理 Irrigation treatment				
		W_0	W_{50}	W_{100}	W_{150}	W_{200}
C∶N	土壤 Soil	8.729±0.736b	8.695±0.733b	9.038±0.665b	10.259±1.037ab	11.082±0.904a
	植株根 Plant root	11.540±2.347a	17.576±7.298a	15.247±3.271a	8.895±2.159a	11.341±4.239a
	植株叶 Plant leaf	12.382±3.199a	19.043±5.740a	16.018±2.665a	13.391±1.909a	14.596±1.466a
C∶P	土壤 Soil	10.331±0.993b	10.182±0.858b	11.862±1.252b	13.504±1.519a	12.252±1.247b
	植株根 Plant root	65.266±9.783a	78.219±16.649a	82.459±18.651a	67.581±15.736a	104.758±36.028a
	植株叶 Plant leaf	278.915±147.729a	121.446±17.224a	93.429±14.459b	103.434±9.271a	160.901±21.505a
N∶P	土壤 Soil	1.221±0.093a	1.303±0.161a	1.339±0.107a	1.338±0.087a	1.119±0.081a
	植株根 Plant root	6.178±0.845a	7.901±3.063a	6.302±1.783a	7.813±1.465a	9.690±2.408a
	植株叶 Plant leaf	22.960±8.872a	10.490±3.594ab	7.540±1.342b	7.425±1.212b	11.102±2.406ab

注:不同小写字母表示不同灌水处理间的差异显著($P<0.05$),下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different irrigations treatments ($P<0.05$), the same below.

2.4　植物—土壤化学计量学特征与各元素的相关关系

对春小麦不同灌水处理下土壤、根、叶片 OC、TN、TP 含量及生态化学计量比进行相关性分析,如表 4 所示。土壤 OC 与 TN、TP、C∶N、C∶P 均存在极显著正相关关系($P<0.01$);土壤 TN 与 TP、N∶P 间存在极显著正相关关系,与 C∶N 呈现极显著负相关关系;土壤 TP 与 C∶P 及 N∶P 均存在极显著负相关关系($P<0.01$);土壤 C∶N 与 C∶P 表现出极显著正相关关系,与 N∶P 存在极显著负相关关系;土壤 C∶P 与 N∶P 表现出极显著正相关关系;植物叶片的 OC、TN 分别与根的 TN、OC 间存在显著正相关关系($P<0.05$);植物叶片 TN 和根 C∶N 呈极显著正相关;土壤 TP 及 C∶N 分别与植物根 C∶P、叶片 C∶N 表现出不同程度的显著负相关关系。

2.5　春小麦植株叶片和根随土壤养分变化的内稳态性分析

从表 5 可以看出,不同灌水处理对植株叶片和根 C、N、P 养分随土壤养分的内稳性变化的影响较小,属于绝对稳态型。

表 3 不同灌水处理下春小麦产量及总生物量

Table 3 Yield and total biomass of spring wheat under different irrigation treatments

指标 Index	灌水处理 Irrigation treatment				
	W_0	W_{50}	W_{100}	W_{150}	W_{200}
产量 Yield/(kg·hm^{-2})	726.418±43.222c	764.104±17.768c	1009.077±75.860bc	1332.684±150.588a	1073.734±125.551ab
总生物量 Total biomass/(kg·hm^{-2})	2112.127±265.298c	3527.080±471.088bc	5215.694±919.900b	7928.537±570.493a	4772.598±974.310b

表 4 土壤与春小麦植株 C、N、P 含量的相关关系

Table 4 Correlation between C, N and P contents of soil and plant (leaf and root) in spring wheat

指标 Index		土壤 Soil						植物根 Plant roots					
		OC	TN	TP	C∶N	C∶P	N∶P	OC	TN	TP	C∶N	C∶P	N∶P
植物叶 Plant leaves	OC	0.095	−0.273	0.280	0.177	0.052	−0.027	0.299	0.434*	0.294	−0.162	0.062	0.151
	TN	0.167	0.080	0.129	−0.062	0.003	−0.162	0.443*	−0.098	−0.003	0.472**	0.273	−0.105
	TP	−0.051	−0.133	0.017	0.138	0.098	0.182	0.137	0.301	0.405*	−0.115	−0.113	−0.047
	C∶N	0.062	−0.269	0.196	−0.104	0.021	0.048	−0.199	0.276	−0.065	−0.347	−0.031	0.386*
	C∶P	0.132	−0.163	0.256	0.220	−0.024	−0.119	−0.195	−0.078	−0.187	−0.084	−0.068	0.018
	N∶P	0.158	0.123	0.077	−0.765**	−0.071	−0.248	−0.220	−0.231	−0.256	0.109	−0.055	−0.029
土壤 Soil	OC	1.000	0.409**	0.468**	0.571**	0.472**	−0.040	−0.307	0.201	0.206	−0.322	−0.257	−0.006
	TN		1.000	0.604**	−0.378**	−0.148	0.328**	−0.120	−0.126	0.209	−0.160	−0.260	−0.231
	TP			1.000	−0.097	−0.473**	−0.497**	−0.138	−0.106	0.322	−0.102	−0.369*	−0.196
	C∶N				1.000	0.684**	−0.268*	−0.178	0.325	0.050	−0.199	−0.089	0.153
	C∶P					1.000	0.469**	−0.174	0.234	0.027	−0.214	−0.023	0.107
	N∶P						1.000	−0.022	−0.075	−0.031	−0.066	0.024	−0.069

注：**，在 0.01 水平(双侧)上显著相关；*，在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

Note: **, significant correlation at 0. 01 level (bilateral); *, significant correlation at 0.05 level (bilateral).

表 5 春小麦植株叶片、根养分和计量比内稳态指数

Table 5 Leaf and root nutrient and stoichiometric specific homeostasis index of spring wheat

器官 Organ	变量 Variable x	变量 Variable y	H	R^2	P	等级 Grade
叶片 Leaf	C_{soil}	C_{leaf}	13.889	0.046	0.283	绝对稳态 Absolute steady state
	N_{soil}	N_{leaf}	−2.551	0.071	0.100	绝对稳态 Absolute steady state
	P_{soil}	P_{leaf}	76.923	0.000	0.282	绝对稳态 Absolute steady state
	$C:N_{soil}$	$C:N_{leaf}$	2.208	0.043	0.083	绝对稳态 Absolute steady state
	$C:P_{soil}$	$C:P_{leaf}$	−1.383	0.100	0.095	绝对稳态 Absolute steady state
	$N:P_{soil}$	$N:P_{leaf}$	−1.767	0.040	0.215	绝对稳态 Absolute steady state
根 Root	C_{soil}	C_{root}	−2.034	0.103	0.121	绝对稳态 Absolute steady state
	N_{soil}	N_{root}	1.873	0.096	0.361	绝对稳态 Absolute steady state
	P_{soil}	P_{root}	14.706	0.004	0.788	绝对稳态 Absolute steady state
	$C:N_{soil}$	$C:N_{root}$	−111.111	0.000	0.532	绝对稳态 Absolute steady state
	$C:P_{soil}$	$C:P_{root}$	7.353	0.003	0.672	绝对稳态 Absolute steady state
	$N:P_{soil}$	$N:P_{root}$	1.996	0.045	0.453	绝对稳态 Absolute steady state

注：H-内稳态指数。 Note: H-Homeostasis index.

3 讨 论

3.1 不同灌水处理下春小麦植株叶片-根-土壤养分含量及其生态化学计量学特征

N、P 元素是植物生长发育过程的重要元素，其化学计量比可作为预测土壤及植物养分限制饱和程度的有效指标[26]。本研究发现，土壤 OC、TN 含量均随灌水量的增加呈先增加后降低的变化趋势，且在 W_{150} 灌水处理下达到最高，这与前人研究结果相似[23]。这是因为灌水会增加水分向土壤深层迁移量，降低水分利用率，随灌溉量的增加，水分运移速度逐渐减缓，同时加速肥料的溶解和有机肥料的矿化，增强土壤水分及土壤通透性，进而促进养分的释放，从而增加土壤 OC、TN 含量[27]；另一方面，过度灌水容易造成水分渗漏，导致土壤孔隙度变小，外部空气不畅，造成土壤缺氧，增加了土壤酸度，使得微生物活动减缓，土壤养分分解速率下降，致使土壤肥力的改善受到限制，并进一步降低土壤养分的吸收利用效率，加速养分流失[28]。同时在施肥量相等、灌水量不同的情况下，春小麦土壤 OC、TN 含量整体上均随土层深度增加而降低，且在 W_{150} 灌水处理下均显著高于其他 4 个处理，这与袁建钰等[23]研究结论一致。土壤有机碳的高低主要受外界环境因素及植被凋落物养分归还的影响，其以枯

枝落叶形式作为土壤中的主要来源,且经过光合作用分解后有机质进入土壤表层,导致养分在土壤表层密集,具有明显的“表聚现象”[29],因此春小麦土壤 0~10 cm 土层 OC、TN 含量相对较高,同时当春小麦灌水量达到 150 mm 时,0~40 cm 土层土壤 OC、TN 含量表现最高,持续过度灌水会抑制土壤养分吸收,灌水量超过 W_{150}时 OC、TN 含量呈明显的下降趋势;而土壤 TP 含量随灌水量和土壤深度的增加差异不显著($P<0.05$),土壤 TP 的空间变异性低于有机碳和全氮,土壤 P 元素来源相对固定,因为 P 是一种沉积性矿物,所以全磷在整个土层空间中的分布较为均匀,本研究结果符合这一规律[30-31]。由以上结论可知,适当增加灌水量会促进土壤养分积累,灌水过多影响土壤化学元素循环[32],因此 W_{150} 为春小麦生长的最优灌水量。本研究中,春小麦产量及其总生物量均在灌水量为 W_{150}时达到最大值。因为随灌水量的增加,微生物活性和种类增强,提高土壤生产力及土壤养分分解速率,促进植物根系的呼吸作用,降低小麦根系下扎阻力,优化小麦根系生长环境,提高光合同化和物质转运能力,促进土壤中水分和养分向上运输,使得春小麦产量及总生物量提高[33];但过度灌水会抑制土壤呼吸作用,土壤过于疏松,透风失墒严重,阻碍了根系吸收周围环境养分,不利于小麦根系下扎。以上不足均会造成小麦产量及总生物量的降低,灌水量超过 W_{150} 时,小麦产量及其总生物量均呈先增加后下降的趋势。张富仓等[34]研究表明,春玉米产量和水分利用效率随灌水量的增加呈现先增长后降低的趋势,本研究中得到与之类似的结果。因此,W_{150}灌水处理应该是春小麦生长发育最适宜的灌水量。综上所述,春小麦充分利用土壤中储存的水分, 提高土壤水分利用效率, 从而更合理、高效地利用土壤水资源和灌溉水资源, 达到节水、高效、优质、高产的效果。

植物体内营养元素水平可以在一定程度上反映植物体内营养平衡状况以及对环境的适应能力[35]。本研究发现,适度灌水有助于提高植物器官(叶片、根)OC、TN 养分,过度灌水将会降低其养分含量(图 1),这与前人[36]的研究结果一致,与马任甜等[37]发现的黄土高原刺槐林趋势基本相近。可能是随灌水量的增加,土壤、根周围环境养分增强且随着光合作用,使得叶片、根养分在土壤中得到有效积累[20],而有研究表明,持续增加灌水量会影响根吸收养分的能力[20],当灌水量超过 150 mm 时,根系生物量降低,根系活力减弱,限制了根部供应的碳水化合物积累[37],进而导致植物器官养分降低。

C∶N 作为土壤固相的重要组成部分,是土壤氮素矿化能力的标志,反映了土壤 C、N 之间的平衡关系,土壤养分是植物养分主要来源,影响植物生长[38]。本研究中,该区土壤 C∶N 平均值(9.56)低于全国土壤平均值(12.3)[26],且在不同灌水处理下 0~40 cm 土层间 C∶N 土壤变化趋势不显著,说明本研究区土壤 OC、TN 作为结构性成分空间分布具有一致性,积累和消耗过程相对稳定,土壤有机质分解速率和养分矿化速率较高[39],相比于 TN,土壤更缺乏 OC,该结论前人研究已证实[40]。赵如梦等[41]在对黄土高原不同种植年限苜蓿草地研究中也得到这一规律,进一步验证了不同灌水处理对春小麦 C∶N 的影响较小且相对稳定[36]。土壤 C∶P 是衡量有机质磷矿化释放或吸收固持能力的象征[42]。本研究区春小麦土壤 C∶P(11.68)低于全国平均水平(52.7)[27],说明该区土壤有机质在分解过程中养分释放较好,可以提高土壤有效磷[43]。N∶P可用以衡量氮磷元素养分限制的阈值,并确定植物生长过程中营养供应的缺失情况,本研究区 N∶P平均值(1.264)低于中国陆地土壤(3.9)[44],说明本研究区 N 元素匮乏,土壤 P 元素变化幅度较小,且当灌水量在 W_{200}时土壤 N∶P 有小幅度降低,所以适度灌水会促进土壤对 N 素的吸收[20]。

叶片 C∶N∶P 计量学特征变化能够反映植物从土壤中获取营养元素的运移循环过程[36]。本研究中春小麦植株叶片、根 C∶N 均值(15.086、12.92)明显低于全国平均水平 (16.27)[45]。叶片、根 C∶N 随灌水量的增加均无明显的相关关系且相对趋于稳定,说明叶片、根 OC、N 两者具有很好的耦合结构关系[45]。叶片、根 C∶P 均值(151.65、79.66)明显低于全球 C∶P 均值 (595)[46],春小麦生长发育过程 TP 含量无固定变化,这与袁建钰等[19]研究结果相似;有研究表明,植株叶片、根 N∶P<14 时受 N 限制,N∶P>16 时受 P 限制,当 N∶P 值介于 14 和 16 之间时受 N 和 P 共同限制或均不受两者限制[20,29]。本研究发现,叶片、根 N∶P 均值(11.903、7.577)均小于 14(临界值)[43],说明春小麦生长受 N 限制,适当增施氮肥有利于缓解春小麦受 N 素限制的程度[47]。

3.2　春小麦植株叶片和根对土壤养分变化的响应及其稳态性

土壤养分是植物生长发育、功能运行及其养分直接利用的重要来源[48]。研究区通过分析土壤养

分与春小麦植株叶片、根 C∶N∶P 化学计量学特征的相关关系发现,土壤 TN 与 C∶N 呈极显著负相关($P<0.01$),土壤 TP 与 C∶P 及 N∶P 均有极显著负相关($P<0.01$),土壤 C∶N 与 N∶P 存在极显著负相关($P<0.01$),表明土壤养分损耗过度使匮乏元素得不到供应;植物叶片 OC、TN 分别与根 TN、OC 间存在显著正相关关系($P<0.05$),植株叶 TN 与根 C∶N呈极显著正相;说明植物叶片、根所吸收的养分不仅来源于土壤,还有植物自身固氮和光合作用等其他外界环境因素的影响[49]。土壤 TP 和植物根 C∶P、土壤及叶片的C∶N均表现出不同程度的显著负相关,表明土壤 OC、TN 含量主要来自植物地上部分叶片分解,导致土壤及植物叶片、根养分循环缓慢,大量养分滞留于叶片、根,因而表现为负相关关系。当土壤养分等外界环境因子或植物吸收利用发生改变时,植物叶片、根可通过内稳态调节使其内部化学元素相对稳定且环境变化保持在较小范围[50]。本研究在分析春小麦内稳态平衡机制时,发现在不同灌水处理下,叶片及根各指标均呈绝对稳态,说明该区春小麦环境适应能力良好。植物叶片、根系主要受 N 素限制,可能是黄土高原属于干旱半干旱地区,土壤水分缺乏,全球温度增加对土壤 N 含量变动有一定影响,使得 TN 含量较低[51]。该结果与中国针叶林优势树种研究大致相同,说明该研究区春小麦具有良好的环境适应能力,进一步验证植物叶片、根 N∶P 可以作为判定植物养分平衡状态的重要指标[23],本研究结果也证实了叶片、根均具有相对较高的内稳态性。而 C、N、P 作为基本结构性元素,随灌水量的增加,土壤根部 OC 和 TN、TP 含量积累而显著增加[52],使得地上部分 N∶P随土壤养分条件的变化而变化。本研究中叶片、根养分和计量比利用内稳态模型模拟结果不显著[53],说明春小麦土壤、叶片和根养分计量学特征存在耦合关系且具有绝对稳定性[54]。因此,灌水处理的不同会影响养分循环及其植物和土壤养分之间的互馈机制,并为黄土高原地区春小麦农田生态系统养分循环提供科学依据。

4 结 论

基于春小麦不同灌水处理下植物—土壤碳氮磷化学计量学及其稳态性特征分析,研究了春小麦不同灌水处理下植物—土壤碳氮磷组分及其稳态性特征,结论如下:

1)该区土壤 OC、TN 具有明显的表聚现象,适当增加灌水量会促进土壤养分积累,有助于提高植株器官(叶片、根)OC、TN 含量,同时由小麦叶片 N∶P<14 可知,春小麦生长主要受 N 限制,应在灌水处理为 W_{150}时,适当增施 N 肥来缓解春小麦生长受 N 素限制的程度;但灌水过多将会影响土壤化学元素循环,抑制土壤养分吸收,降低土壤、植株养分含量。

2)春小麦植株叶片、根 OC、TN、TP 含量及其产量、总生物量均随灌水量增加呈先上升后降低的趋势,均在灌水量为 W_{150}时达到最大值,因此,W_{150}灌水处理最适宜研究区春小麦生长。

3)春小麦具有良好的环境适应能力,叶片、根均具有相对较高的内稳态性,春小麦土壤、叶片和根养分计量学特征存在耦合关系且具有绝对稳定性。

参 考 文 献:

[1] 海旭莹,董凌勃,汪晓珍,等.黄土高原退耕还草地 C、N、P 生态化学计量特征对植物多样性的影响[J].生态学报,2020,40(23):8570-8581.
HAI X Y, DONG L B, WANG X Z, et al. Effects of carbon, nitrogen, and phosphorus ecological stoichiometry characteristics on plant diversity since returning farmland to grassland on the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23): 8570-8581.

[2] 邓健,张丹,张伟,等.黄土丘陵区刺槐叶片—土壤—微生物碳氮磷化学计量学及其稳态性特征[J].生态学报,2019,39(15):5527-5535.
DENG J, ZHANG D, ZHANG W, et al. Carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry and homeostasis characteristics of leaves, soil, and microbial biomass of Robinia pseudoacacia forests in the loess hilly region of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(15): 5527-5535.

[3] 杨文,周脚根,王美慧,等.亚热带丘陵小流域土壤碳氮磷生态计量特征的空间分异性[J].土壤学报,2015,52(6):1336-1344.
YANG W, ZHOU J G, WANG M H, et al. Spatial variation of ecological stoichiometry of soilC, N and P in a small hilly watershed in subtropics of China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(6): 1336-1344.

[4] 曾全超,李鑫,董扬红,等.陕北黄土高原土壤性质及其生态化学计量的纬度变化特征[J].自然资源学报,2015,30(5):870-879.
ZENG Q C, LI X, DONG Y H, et al. Ecological stoichiometry characteristics and physical-chemical properties of soils at different latitudes on theLoess Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(5): 870-879.

[5] 颜晓,卢志红,魏宗强,等.几种典型酸性旱地土壤磷吸附的关键影响因素[J].中国土壤与肥料,2019,(3):1-7.
YAN X, LU Z H, WEI Z Q, et al. Key factors influencing phosphorus sorption for several acid upland soils[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2019,(3): 1-7.

[6] 白一茹,张兴,包维斌,等.黄土丘陵区不同土地利用方式土壤碳氮磷及其生态化学计量特征[J].干旱地区农业研究,2019,37(4):117-123,131.
BAI Y R, ZHANG X, BAO W B, et al. The soilcarbon, nitrogen, and phosphorus contents and their stoichiometry under different land uses in loess hilly region[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(4): 117-123, 131.

[7] 彭学义,贾亚男,蒋勇军,等.中梁山岩溶槽谷区不同土地类型土壤生态化学计量学特征[J].中国农学通报,2019,35(5):84-92.
PENG X Y, JIA Y N, JIANG Y J, et al. Soil ecological stoichiometric

characteristics of different land types in karst valley area of Zhongliang Mountain[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(5): 84-92.

[8] 张恒嘉,黄高宝.绿洲调亏灌溉春小麦农田生态化学计量特征[J].中国生态农业学报,2011,19(1):59-62.
ZHANG H J, HUANG G B. Ecological stoichiometric characteristics of oasis spring wheat fields under regulated deficit irrigation[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(1): 59-62.

[9] 杜延军,李自珍,李凤民.半干旱黄土高原地区地膜覆盖和底墒对春小麦生长及产量的影响[J].西北植物学报,2004,24(3):404-411.
DU Y J, LI Z Z, LI F M. Effects of plastic film mulch and pre-sowing soil water on growth and yield of spring wheat in semi-arid areas of Loess Plateau[J]. Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica, 2004, 24(3): 404-411.

[10] 邓博文,许瑶瑶,陈逸飞,等.中国针叶林优势树种叶片氮磷钾生态化学计量特征及内稳态分析[J].林业科学研究,2020,33(6):81-87.
DENG B W, XU Y Y, CHEN Y F, et al. Stoichiometry and homeostasis of nitrogen, phosphorus and potassium in leaf of dominant tree species in China's coniferous forests[J]. Forest Research, 2020, 33(6): 81-87.

[11] 蒋家慧,韩伟,衣先众,等.氮肥不同底追比例对强筋小麦籽粒品质和产量的影响[J].莱阳农学院学报,2003,20(2):101-103.
JIANG J H, HAN W, YI X Z, et al. The effects of different proportion of basal nitrogen and top dressing nitrogen on wheat quality and yield[J]. Journal of Laiyang Agricultural College, 2003, 20(2): 101-103.

[12] 宫菲,杜灵通,孟晨,等.宁夏陆地生态系统水分利用效率特征及其影响因子[J].生态学报,2019,39(24):9068-9078.
GONG F, DU L T, MENG C, et al. Characteristics of water use efficiency in terrestrial ecosystems and its influence factors in Ningxia Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(24): 9068-9078.

[13] 李单凤,于顺利,王国勋,等.黄土高原优势灌丛营养器官化学计量特征的环境分异和机制[J].植物生态学报,2015,39(5):453-465.
LI D F, YU S L, WANG G X, et al. Environmental heterogeneity and mechanism of stoichiometry properties of vegetative organs in dominant shrub communities across the Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2015, 39(5): 453-465.

[14] 张丽芳,胡海林.土壤酸碱性对植物生长影响的研究进展[J].贵州农业科学,2020,48(8):40-43.
ZHANG L F, HU H L. Research progress on effect of soil pH on plant growth[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2020, 48(8): 40-43.

[15] 张旭,李莎,蔡煜,等.干旱区不同水氮梯度滴灌冬小麦干物质积累动态特征及产量效应[J].西南农业学报,2020,33(9):2018-2026.
ZHANG X, LI S, CAI Y, et al. Analysis on DMA dynamic characteristics and yield of winter wheat with different water and nitrogen gradients under drip irrigation in arid area[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2020, 33(9): 2018-2026.

[16] 李冬冬,方昭,杜好田,等.黄土高原不同植被带草本植物叶片与土壤碳氮分布特征[J].植物营养与肥料学报,2019,25(5):841-850.
LI D D, FANG Z, DU H T, et al. Distribution characteristics of carbon and nitrogen in herbaceous plants leaves and soil of different vegetation belts in the Loess Plateau[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2019, 25(5): 841-850.

[17] 李栎,王光军,周国新,等.会同桢楠人工幼林土壤 C: N: P 生态化学计量的时空特征[J].中南林业科技大学学报,2016,36(2):96-100,109.
LI L, WANG G J, ZHOU G X, et al. Temporal and spatial characteristics of soil C: N: P ecological stoichiometry under Phoebe zhennan plantation of Huitong[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2016, 36(2): 96-100, 109.

[18] 张平,张慧,刘俊娜,等.干旱及复水处理对抗旱性不同小麦品种/系苗期生理生化指标的影响[J].西北农业学报,2020,29(12):1795-1802.
ZHANG P, ZHANG H, LIU J N, et al. Effects of drought and re-watering treatment on physiological and biochemical indexes of different drought-resistant wheat varieties/lines at seedling stage[J].Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2020,29(12):1795-1802.

[19] 袁建钰,李广,闫丽娟,等.黄土高原不同灌水量下春小麦土壤与植物碳氮磷含量及其化学计量比特征[J].草业科学,2020,37(9):1803-1812.
YUAN J Y, LI G, YAN L J, et al. Soil and plantcarbon, nitrogen, and phosphorus content and their stoichiometry in spring wheat under different irrigation treatments in the Loess Plateau[J]. Pratacultural Science, 2020, 37(9): 1803-1812.

[20] 刘玥,杨继松,于洋,等.辽河口不同类型湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J].生态学杂志,2020,39(9):3011-3020.
LIU Y, YANG J S, YU Y, et al. Stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus of soil in the Liaohe estuary wetlands[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(9): 3011-3020.

[21] 逯玉兰,李广,闫丽娟,等.1971-2017 年陇中地区气候变化及其对旱地春小麦产量的影响[J].麦类作物学报,2020,40(2):234-242.
LU Y L, LI G, YAN L J, et al.Climate changes in middle of Gansu province from 1971 to 2017 and its impact on yield of dryland spring wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2020, 40(2): 234-242.

[22] 张尚文,李广,闫丽娟,等.灌水量和追氮方式对春小麦生态化学计量特征的影响[J].麦类作物学报,2020,40(8):945-954.
ZHANG S W, LI G, YAN L J, et al. Effect of irrigation amount and-nitrogen fertilization methods on ecological stoichiometry of spring wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2020, 40(8): 945-954.

[23] PERSSON J, FINK P, GOTO A, et al. To be or not to be what you eat: regulation of stoichiometric homeostasis among autotrophs and heterotrophs[J]. Oikos, 2010, 119(5): 741-751.

[24] 张莎莎,李爱琴,王会荣,等.不同海拔杉木人工林土壤碳氮磷生态化学计量特征[J].生态环境学报,2020,29(1):97-104.
ZHANG S S, LI A Q, WANG H R, et al. Ecological stoichiometry of soil carbon, nitrogen and phosphorus in *Cunninghamia lanceolata* plantation across an elevation gradient[J]. Ecology and Environment Sciences, 2020, 29(1): 97-104.

[25] 姚雪玲,杨国靖,王帅,等.黄土丘陵沟壑区不同深度土壤水分对降雨的响应及其稳定性[J].干旱区地理,2021,44(2):507-513.
YAO X L, YANG G J, WANG S, et al. Soil moisture response and stability to rainfall in different depths in Loess Plateau[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(2): 507-513.

[26] YAO X M, XIAO B, KIDRON G J, et al. Respiration rate of moss-dominated biocrusts and their relationships with temperature and moisture in a semiarid ecosystem[J]. Catena, 2019, 183: 104195.

[27] 虎净,危常州,宋凯,等.干旱区滴灌春小麦氮、磷、钾养分吸收规律[J].新疆农业科学,2015,52(5):808-814.
HU J, WEI C Z, SONG K, et al. Law of spring wheat N, P, K absorption under drip irrigation in arid regions[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2015, 52(5): 808-814.

[28] 周加森,马阳,吴敏,等.不同水肥措施下的冬小麦水氮利用和生物

效应研究[J].灌溉排水学报,2019,38(9):36-41.
ZHOU J S, MA Y, WU M, et al.Water and nitrogen utilization and biological effects of winter wheat under different water and fertilizer measures[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(9): 36-41.

[29] 王慧,郭月峰,姚云峰,等.不同土地利用方式下土壤碳氮磷化学计量特征[J].西南农业学报,2020,33(5):995-1000.
WANG H, GUO Y F, YAO Y F, et al. Ecological stoichiometry of soil carbon, nitrogen and phosphorus under different land use patterns [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2020, 33(5): 995-1000.

[30] 岳泽伟,李向义,李磊,等.氮添加对昆仑山高山草地土壤、微生物和植物生态化学计量特征的影响[J].生态科学,2020,39(3):1-8.
YUE Z W, LI X Y, LI L, et al. Responses of soil, microbes and plant ecological stoichiometric characteristics tonitrogen addition in an alpine grassland of Kunlun Mountain[J]. Ecological Science, 2020, 39(3): 1-8.

[31] ELSER J J, STERNER R W, GOROKHOVA E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems[J]. Ecology Letters, 2000, 3(6): 540-550.

[32] HAN W X, FANG J Y, GUO D L, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. New Phytologist, 2005, 168(2): 377-385.

[33] 王旭刚,郝明德,李建民,等.氮磷配施对旱地小麦产量和吸肥特性的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2007,35(2):138-142.
WANG X G, HAO M D, LI J M, et al. Effects of fertilizer N,P on wheat yield and nutrients uptake characters in dryland of Loess Plateau[J]. Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition), 2007, 35(2): 138-142.

[34] 刘冬,张剑,包雅兰,等.水分对敦煌阳关湿地芦苇叶片与土壤C、N、P生态化学计量特征的影响[J].生态学报,2020,40(11):3804-3812.
LIU D, ZHANG J, BAO Y L, et al. Effects of soil moisture on *Phragmites australis* leaves and soil C, N and P ecological stoichiometric characteristics in Yangguan wetland, Dunhuang[J]. Acta EcologicaSinica, 2020, 40(11): 3804-3812.

[35] 马任甜,安韶山,黄懿梅.黄土高原不同林龄刺槐林碳、氮、磷化学计量特征[J].应用生态学报,2017,28(9):2787-2793.
MA R T, AN S S, HUANG Y M. C, N and P stoichiometry characteristics of different-aged Robinia *pseudoacacia* plantations on the Loess Plateau, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(9): 2787-2793.

[36] 文春燕,朱嘉磊,薄慧娟,等.不同水氮处理下毛白杨碳氮磷化学计量特征[J].应用与环境生物学报,2019,25(2):254-261.
WEN C Y, ZHU J L, BO H J, et al. Effects of irrigation and nitrogen application on carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry of *Populustomentosa*[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2019, 25(2): 254-261.

[37] 张芸,李惠通,张辉,等.不同林龄杉木人工林土壤C:N:P化学计量特征及其与土壤理化性质的关系[J].生态学报,2019,39(7):2520-2531.
ZHANG Y, LI H T, ZHANG H, et al. Soil C: N: P stoichiometry and its relationship with the soil physicochemical properties of different aged Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(7): 2520-2531.

[38] TOMOHIRO R, ARIZONO I, TAKEMOTO Y.Economic design of double sampling Cpm control chart for monitoring process capability [J]. International Journal of Production Economics, 2020, 221: 107468.

[39] 陈晓萍,郭炳桥,钟全林,等.武夷山不同海拔黄山松细根碳、氮、磷化学计量特征对土壤养分的适应[J].生态学报,2018,38(1):273-281.
CHEN X P, GUO B Q, ZHONG Q L, et al. Response of fine rootcarbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry to soil nutrients in *Pinus taiwanensis* along an elevation gradient in the Wuyi Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(1): 273-281.

[40] 赵丽萍,刘家勇,赵培方,等.水分胁迫对甘蔗根系及地上部生长的影响[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2019,45(1):10-15.
ZHAO L P, LIU J Y, ZHAO P F, et al. The impact of water stress on the growth of roots and above-ground parts in sugarcane[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2019, 45(1): 10-15.

[41] 王宝荣,杨佳佳,安韶山,等.黄土丘陵区植被与地形特征对土壤和土壤微生物生物量生态化学计量特征的影响[J].应用生态学报,2018,29(1):247-259.
WANG B R, YANG J J, AN S S, et al. Effects of vegetation and topography features on ecological stoichiometry of soil and soil microbial biomass in the hilly-gully region of the Loess Plateau, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(1): 247-259.

[42] 冯德枫,包维楷.土壤碳氮磷化学计量比时空格局及影响因素研究进展[J].应用与环境生物学报,2017,23(2):400-408.
FENG D F, BAO W K. Review of the temporal and spatial patterns of soil C : N : P stoichiometry and its driving factors[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2017, 23(2): 400-408.

[43] 曾冬萍,蒋利玲,曾从盛,等.生态化学计量学特征及其应用研究进展[J].生态学报,2013,33(18):5484-5492.
ZENG D P, JIANG L L, ZENG C S, et al. Reviews on the ecological stoichiometry characteristics and its applications[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(18): 5484-5492.

[44] ÅGREN G I. Stoichiometry and nutrition of plant growth in natural communities [J]. Annual Review of Ecology Evolution and Systematics, 2008, 39(1): 153-170.

[45] 刘新永,田长彦.棉花膜下滴灌水氮耦合效应研究[J].植物营养与肥料学报,2007,13(2):286-291.
LIU X Y, TIAN C Y. Coupling effect of water and nitrogen of cotton under plastic mulching by drip irrigation[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(2): 286-291.

[46] 赵如梦,张炳学,王晓霞,等.黄土高原不同种植年限苜蓿草地土壤与植物化学计量特征[J].草业科学,2019,36(5):1189-1199.
ZHAO R M, ZHANG B X, WANG X X, et al. Ecological stoichiometry characteristics of soil and plant of alfalfa with different growing years on the Loess Plateau[J]. Pratacultural Science, 2019, 36(5): 1189-1199.

[47] STERNER R W, ELSER J J. Ecological stoichiometry:the biology of elements from molecules to the biosphere[M].New Jersey: Princeton University Press, 2002.

[48] 张仁懿,史小明,李文金,等.亚高寒草甸物种内稳性与生物量变化模式[J].草业科学,2015,32(10):1539-1547.
ZHANG R Y, SHI X M, LI W J, et al.Response of species homeostasis and biomass on a sub-alpine grassland[J]. Pratacultural Science, 2015, 32(10): 1539-1547.

(下转第202页)