陇中黄土高原不同土地利用方式下土壤碳氮磷生态化学计量特征

张忱[1],李广[2*],鲁文德[2],邓鑫山[2],杨娟娟[2]

(1.甘肃农业大学信息科学技术学院,甘肃 兰州 730070;2.甘肃农业大学林学院,甘肃 兰州 730070)

摘要:【目的】研究陇中黄土高原土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)含量及其化学计量学特征对不同土地利用方式的响应。【方法】选取该地区沙棘林地、苜蓿草地、撂荒裸地和小麦地4种不同土地利用方式土壤,测定土壤C、N、P含量及其理化性质。【结果】这4种土地利用方式下土壤理化性质差异显著($P<0.05$)。沙棘林地土壤容重最高,小麦地土壤孔隙度和pH值最高,土壤含水量最低;土壤有机碳(SOC)含量具体表现为苜蓿草地>沙棘林地>撂荒裸地>小麦地,土壤全氮(TN)含量表现为苜蓿草地>沙棘林地>小麦地>撂荒裸地,土壤全磷(TP)含量则表现为小麦地>沙棘林地>苜蓿草地>撂荒裸地。在全生长期下,沙棘林地C:N高出其他3种土地利用方式21.93%~33.70%,且存在显著差异($P<0.05$);而C:P及N:P均表现为苜蓿草地最高;与撂荒裸地相比,苜蓿草地土壤C:P和N:P分别提高了42.21%和42.83%。相关性分析表明,SOC和TN与C:P和N:P之间均呈显著正相关关系($P<0.001$),而土壤TP与SOC、TN及化学计量特征之间无显著性。【结论】苜蓿草地在短期内对土壤养分积累表现出良好的效果,其SOC和TN含量较高,且化学计量学特征表现出较好的平衡,但其是否能够长期稳定积累土壤养分,还需要进一步深入研究。

关键词:碳氮磷;生态化学计量;陇中黄土高原;土地利用方式

中图分类号:S153.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2025)02-0131-10

DOI:10.13817/j.cnki.cyycp.2025.02.015

土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)是影响生态系统初级生产力的主要元素[1],也是植物生长必需的营养元素[2],对土壤养分循环及其相互作用至关重要[3]。生态化学计量是强调和研究生态过程中多重化学元素的平衡和耦合关系[4],而土壤生态化学计量学是其重要组成部分,以研究土壤C、N、P含量及其相对比例来理解和揭示土壤养分有效性和生态系统过程[5]。近年来,研究人员对土壤C、N、P含量及化学计量学特征进行了大量研究,涉及生物学科的不同生态系统与不同层次,并取得了一系列成果。有研究表明,人工草地土壤C:N受到C和N限制,土壤C:P受到C限制,土壤N:P受到C和N的限制,认为可以通过适当添加C和N养分来改善土壤质量[6]。还有研究表明,P添加会使C:N:P的化学平衡失衡,并可能影响陆地生态系统的功能[7]。因此,探究土壤C、N、P化学计量特征对揭示这3种元素间的交互作用和平衡制约关系、土壤质量以及养分循环等具有重要意义。

土地利用方式是在地方尺度下众多环境属性的综合体,也是影响土壤养分含量的主要因素之一[8],会对土壤养分及化学计量特征产生直接影响,从而影响

收稿日期:2024-04-10;**修回日期:**2024-05-21

基金资助:国家自然科学基金(32360438);甘肃省重点研究发展计划(22YF7FA116);甘肃省高等学校产业支撑项目(2022CYZC-41);甘肃省财政专项(GSCZZ 20160909)

作者简介:张忱(1998-),女,甘肃庆阳人,助教,研究方向为农业工程与信息技术。

E-mail:chen573143203@qq.com

*通信作者,研究方向为作物模拟模型,系统集成和农业信息化研究。Email:lig@gsau.edu.cn

生态系统过程和功能[9]。近年来,学者们在不同区域开展土地利用方式与土壤C、N、P含量及化学计量特征研究。大量研究表明,不同土地利用方式以及相关管理实践会对土壤C、N、P含量及化学计量产生显著影响[10-11]。姚卫举等[3]基于辽河三角洲地区7种土地利用方式,发现土地利用方式的改变会导致土壤C、N、P化学计量特征发生变化。苟国花[12]基于青藏高原5种土地利用方式探讨土壤C、N、P生态化学计量特征变化,结果发现青藏高原北部林地C:N、C:P和N:P最高,南部高寒草甸草地C:N最高,林地C:P和N:P最高。Li等[13]基于黄土丘陵区探究深层土壤C、N、P储量及其化学计量特征对土地利用变化的响应,发现与耕地相比,林地和草地土壤C:P、N:P和C:N:P比值均有所提高,且林地的比值高于草地,表明造林是退化土地土壤养分恢复的最佳选择。Zhao等[14]基于已报道的三峡库区土壤C、N、P含量分析该地区土壤C:N、C:P、N:P值变化的驱动因素,发现在"长江三峡工程"项目下,土地利用的大规模变化可能会显著影响土壤中的C:N、C:P和N:P比率。因此,了解不同土地利用方式下的土壤养分含量及化学计量特征变化有助于阐明人类活动对土壤质量和健康、水土保持、生态退化和恢复的影响[11]。

黄土高原作为中国较大的地理区域之一,在全球生物地球化学C周期和气候变化中发挥着重要作用[15]。与此同时,黄土高原也是我国水土流失、沙漠化较为严重的地区,是典型生态脆弱区[16-17]。自实施退耕还林(草)工程以来,人们通过植被恢复、生态修复、调整土地利用方式等来逐步改善黄土高原地区的生态环境[18-19],使该地区的植被覆盖度显著增加、土壤理化性质有效改善,水土流失和土壤侵蚀得到控制[20-21]。目前,关于人类活动对黄土高原地区土壤C、N、P的影响已有过一些研究,但关于不同土地利用方式下土壤C、N、P含量及其生态化学计量特征的综合研究仍较少,且多集中在黄土丘陵区[13,22-23]。鉴于此,本研究选取在陇中黄土高原地区作为研究区域,分析该地区不同土地利用方式下土壤C、N、P含量和化学计量特征的变化,以期为该地区水土保持、生态恢复与保护管理提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区(103°52′~105°13′ E,34°26′~35°35′ N)位于甘肃省定西市水土保持研究所试验区。该区属于典型黄土高原丘陵沟壑区,平均海拔1 974 m,气候为中温带干旱、半干旱气候,年温差大,年平均气温6.3 ℃,年平均降水量为390.99 mm,主要集中在7~9月。该流域土壤类型以典型黄绵土为主,土质绵软,抗侵蚀能力较弱。该区常年干旱缺水,植被稀少,自然植被以禾本科(Poaceae)、豆科(Fabaceae)、菊科(Asteraceae)等草本植物为主,多为紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、红豆草(*Onobrychi sviciifolia*),同时有少量灌木分布,如柠条(*Caragana Korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等,主要的农作物有玉米(*Zea mays*)、马铃薯(*Solanum tuberosum*)、春小麦(*Triticum aestivum*)等。

1.2 试验设计与样品采集

通过对研究区生态环境特征和植被特征进行实地调查并查阅相关资料,以撂荒裸地为对照,选取苜蓿草地、沙棘林地、传统耕作小麦地4种不同土地利用类型,确定其为陇中黄土高原典型试验区(样地基本信息见表1)。各试验区随机选择3个小样地,大小为4 m×6 m。2022年分别在生长初期(4月中旬)、生长中期(7月中旬)、生长末期(10月中旬)取样,按照"S"型取样法在各样地中随机选取5个点,采用直径5 cm土钻按0~10,10~20,20~40 cm分层取土,剔除杂质,装入自封袋放置在装有冰袋的样品箱中低温运输,带回实验室后用于各项指标的测定。将所需土壤样品带回后分成两份,其中将一份鲜土过2 mm的筛子筛选去杂后,贮藏在4 ℃冰箱内用于测土壤鲜样指标;另一份放在阴凉通风处风干,过筛去杂后测定pH等其他土壤理化性质。

1.3 测定方法

采用环刀法测定土壤容重[24];用一定容积的钢制环刀,切割自然状态下的土壤,使土壤恰好充满环刀容积,然后称量并根据土壤自然含水量计算每单位体积的烘干土重即土壤容重;土壤孔隙度通过计算得出:孔隙度=[1-容重(g/cm^3)/密度(g/cm^3)]×100%;

表 1　不同土地类型的基本信息

Table 1　Basic Information of Different Land Types

植被类型	地理坐标	植被覆盖度	样地扰动历史与耕作制度
荒草地	104°37′57″ E,35°34′54″ N	＞90	1990年被遗弃,自然恢复为一片草原
沙棘林地	104°38′60″ E,35°34′48″	＞85	20世纪90年代前被砍伐、开垦,2000年实行“退耕还林(草)”自然恢复成为灌木群落
苜蓿草地	104°19′01″ E,35°34′48″ N	＞90	2015年在耕地基础上种植紫苜蓿,并进行围封,成活后不再进行任何管护、收割措施
传统耕作小麦地	103°52′ E,34°26 ′N	＞70	3月25日播种作物,每块样地播种量为187.5 kg/hm^2,行距25cm。配施150 kg/hm^{2}过磷酸二铵和62.5 kg/hm^{2}尿素作为基肥,于播种时一次性施入。收获后至冬至结合当地的耕作经验“三耕两耱”。

采用电位法(水土比2.5∶1)测定土壤pH值[24];称取10 g通过1 mm筛孔的风干土样置100 mL烧杯中,加蒸馏水25 mL混匀,静置30 min,用校正过的pH计测定悬液的pH值;

土壤含水量采用铝盒烘干法测定[24],空铝盒称重后放入土样,置于105～110 ℃烘箱中烘干至恒重,测得土壤烘干重,再根据该值计算水分重量的百分比;

土壤有机碳(SOC)采用Walkley－Black重铬酸盐氧化法测定[24],使用重铬酸钾和硫酸的混合物来氧化有机物质,然后对硫酸亚铁进行滴定。风干土壤样品(0.1 g)用7.5 mL重铬酸钾和7.5 mL浓缩硫酸在180 ℃下提取30 min;

土壤全氮(TN)采用氧化－外加热滴定法测定[24],称取土壤样品1 g加入8 mL浓硫酸放置于400 ℃消煮炉上加热至乳白色,整个溶液转移到100 mL容量瓶定容,待溶液冷却澄清后用移液枪吸取5 mL上清液于消煮管中并加入4 mL氢氧化钠(10 mol/L)和5 mL硼酸溶液进行定氮,后用稀硫酸溶液进行滴定。

土壤全磷(TP)采用钼锑抗比色法测定[24],称取0.5 g风干土样,加入浓硫酸和高氯酸进行高温消解,消解结束后用蒸馏水定容到100 mL,消解液加入工作液后在700 nm处进行比色测定。

1.4　数据处理

采用SPSS 22.0软件进行数据计算和统计分析,采用单因素方差分析(ANOVA)和最小显著性差异(LSD)分析不同土地利用方式及生长期下土壤养分及化学计量比间的显著差异;通过双因素方差分析(Two-wayAVONA),探究不同土地利用方式、生长期及其交互作用对土壤养分及化学计量比的影响。通过Pearson相关性分析土壤养分及化学计量比间相关关系。采用Origin 2021软件绘制图形。

2　结果与分析

2.1　不同土地利用方式对土壤容重、孔隙度、pH和含水量的影响

土壤容重以沙棘林地最高,小麦地最低,且随土层加深各处理土壤容重呈逐渐递增趋势。土壤孔隙度在三个土层下均表现为小麦地最高,并随土层加深土壤孔隙度逐渐降低。土壤pH显示各试验用地土壤均为碱性,其中以小麦地最高,沙棘林地最低,并与其余用地差异显著(P＜0.05)。各处理下,土壤含水量均随土层加深呈逐渐递增趋势,其中,0～10 cm土层以苜蓿草地最高,10～20 cm,20～40 cm土层则以沙棘林地最高,而小麦地在3个土层间土壤含水量均为最低(表2)。

2.2　不同土地利用方式对土壤碳氮磷的影响

不同土地利用方式和生长期内土壤SOC、TN、TP含量的双因素方差分析(表3)显示,土壤SOC在不同土地利用方式、生长期以及二者交互作用下均存在极显著差异(P＜0.001)。土壤TN含量在不同土地利用方式单一因素作用以及不同土地利用方式和生长期交互作用下也表现出极显著差异(P＜0.001),而其在生长期单一因素作用差异不显著。土壤TP含量在不同土地利用方式、生长期以及二者交互作用则均表现为显著相关(P＜0.05)。

表2 不同土地利用方式对土壤容重、孔隙度、pH值和含水量的影响

Table 2 The effects of different land use methods on soil bulk density, porosity, pH, and moisture content

处理	土层/cm	容重/(g·cm^{-3})	孔隙度/%	pH值(水土比2.5:1)	含水量/%
撂荒裸地	0～10	1.17±0.02^{Ba}	55.96±0.07^{Ab}	7.85±0.02^{Cb}	8.84±0.24^{Cab}
	10～20	1.18±0.04^{Bbc}	55.42±0.03^{Aab}	7.96±0.01^{Bb}	11.01±0.40^{Bab}
	20～40	1.21±0.06^{Aa}	54.54±0.01^{Bb}	8.05±0.02^{Ab}	13.07±0.38^{Ab}
苜蓿草地	0～10	1.17±0.08^{Ba}	55.90±0.02^{Ab}	7.81±0.02^{Cb}	10.61±0.78^{Ca}
	10～20	1.19±0.04^{ABab}	55.06±0.03^{ABbc}	7.89±0.01^{Bc}	12.47±0.33^{ABa}
	20～40	1.22±0.01^{Aa}	54.05±0.05^{Bb}	7.97±0.03^{Ac}	13.52±0.55^{Ab}
沙棘林地	0～10	1.16±0.03^{Cab}	56.30±0.01^{Aab}	7.54±0.03^{Cc}	9.81±0.96^{Bab}
	10～20	1.20±0.04^{Ba}	54.60±0.03^{Bc}	7.67±0.01^{Bd}	12.48±1.01^{Ba}
	20～40	1.22±0.06^{Aa}	53.82±0.02^{Cb}	7.77±0.05^{Ad}	16.18±0.80^{Aa}
小麦地	0～10	1.15±0.04^{Bb}	56.72±0.01^{Aa}	8.09±0.01^{Ca}	7.97±0.57^{Bb}
	10～20	1.17±0.02^{Ac}	55.87±0.01^{Ba}	8.17±0.01^{Ba}	9.33±0.38^{Bb}
	20～40	1.18±0.05^{Ab}	55.54±0.03^{Ba}	8.22±0.05^{Aa}	12.01±0.40^{Ab}

注:不同大写字母表示相同处理下不同土层间差异显著,不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著($P<0.05$),下同。

除小麦地外,其余土地利用方式下土壤SOC含量在生长期内随时间变化相同,均表现为先增后减的变化趋势,小麦地土壤SOC含量则随生育期推进呈现逐渐降低趋势。随生长期推移,撂荒裸地以及苜蓿草地处理下,土壤TN含量呈先增后减的变化趋势,沙棘林地、小麦地则分别表现出“V”字型和逐渐降低的变化趋势。不同土地利用方式下土壤TP含量在整个测定期内表现各不相同,且各处理在全生长期间差异不大。整体看来,4种土地利用方式下土壤SOC、TN含量均以苜蓿草地最高,土壤SOC含量具体表现为苜蓿草地>沙棘林地>撂荒裸地>小麦地,土壤TN含量表现为苜蓿草地>沙棘林地>小麦地>撂荒裸地(图1)。与对照用地(撂荒裸地)相比,苜蓿草地处理下土壤SOC、TN含量分别增加47.10%和48.76%。土壤TP含量则表现为小麦地最高,撂荒裸地最低,且与之相比,土壤TP含量提高了7.80%。

表3 土地利用方式和生长期对土壤C、N、P含量及化学计量比的影响

Table 3 The effects of land use patterns and growth periods on soil C, N, P content and stoichiometric ratios

因素	SOC	TN	TP	C:N	C:P	N:P
土地利用方式	***	***	*	***	***	***
生长期	***	×	*	***	***	×
土地利用方式×生长期	***	***	*	***	**	**

注:SOC为土壤有机碳;TN为全氮;TP为全磷;C:N为碳氮比;C:P为碳磷比;N:P为氮磷比;* 表示$P<0.05$的显著水平;** 表示$P<0.01$的显著水平;*** 表示$P<0.001$的显著水平,下同。

2.3 不同土地利用方式对土壤养分化学计量特征的影响

土壤C:N和土壤C:P在不同土地利用方式以及生长期单一因素作用下均存在显著差异($P<0.001$),在二者交互作用下也分别在$P<0.001$和$P<0.01$水平下差异显著。土壤N:P表现为在不同土地利用方式单一因素作用及不同土地利用方式和生长期交互作用下差异显著($P<0.001$),在生长期单一因素作用下无显著差异($P>0.05$)(表3)。

随生长期推移,撂荒裸地、苜蓿草地以及沙棘林地处理下土壤C:N呈先增后减的变化趋势,小麦地土壤C:N则呈逐渐降低的变化趋势。4种土地利用方式下土壤C:P随时间变化相同,整体表现为生长中期显著高出生长初期及生长末期。撂荒裸地以及小麦地土壤N:P随生长期推进均呈现先升后降的趋势,苜蓿草地、沙棘林地则随生长期变化分别呈逐渐上升和先减后增的变化趋势。整体来看,全生长期下,沙棘林地土壤C:N高于其他三种用地21.93%～33.70%,且与各用地之间差异显著($P<0.05$)。土壤C:P及土壤N:P在全生长期内均表现为苜蓿草地最高,且与其他

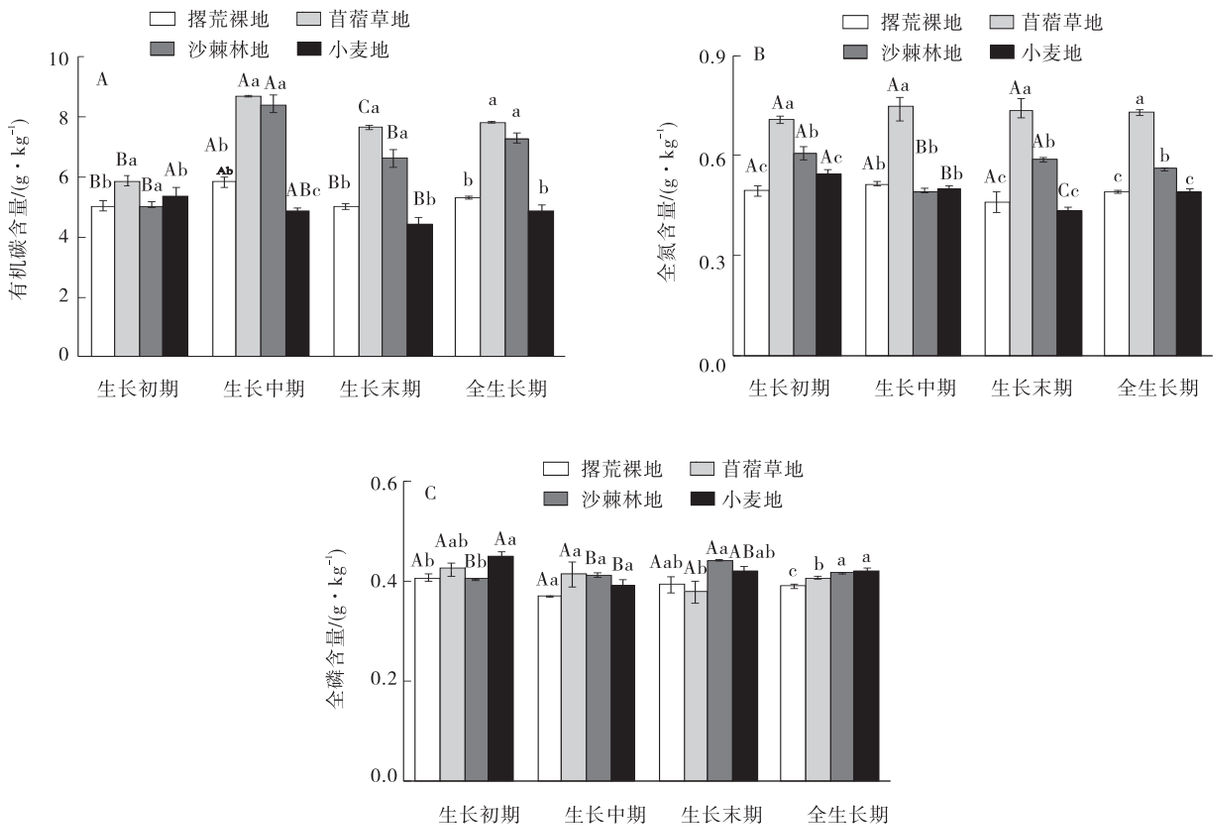

图 1　不同土地利用方式下 0~40 cm 土壤有机碳、全氮及全磷含量

Fig. 1　Soil organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus contents in 0~40 cm soil under different land use patterns

注：小写字母表示同一生长期不同土地利用方式间差异显著（$P<0.05$）；不同大写字母表示同一土地利用方式下不同生长期间差异显著（$P<0.05$），下同。

用地之间差异显著（$P<0.05$）（图 2）。具体表现为苜蓿草地＞沙棘林地＞撂荒裸地＞小麦地。与撂荒裸地相比，苜蓿草地处理下土壤 C∶P 及土壤 N∶P 分别提高 42.21% 和 42.83%。

2.4　不同土地利用方式下土壤性质及其与化学计量比的相关关系

土壤 SOC 与土壤容重及土壤含水量之间呈显著正相关关系（$P<0.05$），与土壤孔隙度以及土壤 pH 则分别呈显著（$P<0.05$）与极显著负相关关系（$P<0.001$）。土壤 TN 和 TP 与土壤容重、土壤含水量、土壤孔隙度以及土壤 pH 之间也存在一定相关关系，但相关关系不显著。土壤 SOC 和 TN 对土壤化学计量比具有显著影响，其中，与土壤 C∶P 和土壤 N∶P 之间存在极显著正相关关系。土壤 SOC 与土壤 TN 之间也表现为极显著正相关关系（$P<0.001$）。而土壤 TP 与土壤 SOC、土壤 TN 以及土壤化学计量比之间关系均不显著（图 3）。

3　讨论

3.1　不同土地利用方式对土壤土壤容重、孔隙度、pH 和含水量的影响

土地利用方式是生态系统中重要的组成部分，其变化对土壤理化性质有显著影响[25]。白一茹等[26]在陕北农牧交错带的研究发现，不同土地利用方式下的土壤物理性质具有显著差异。Yan 等[27]的研究也表明，土壤容重与土壤 pH 在不同土地利用方式下均存在不同差异。一般来说，相较于农草地，林地的土壤酸碱度更低，而耕地由于土质疏松，具有良好的通透性，使得耕地相较于其他土地利用方式土壤容重更低。另有研究发现[28]，林地土壤系统具有较好的持水能力和供水能力，且更有利于土壤养分的积累。本研究结果发现，与撂荒裸地相比，小麦地显著提升了土壤孔隙度、土壤 pH 值，并降低了土壤容重，与上述研究结果一致。这是因为传统耕作方式下，加大了对小麦地土壤的扰动，土壤耕层结构被破坏，造成地力下

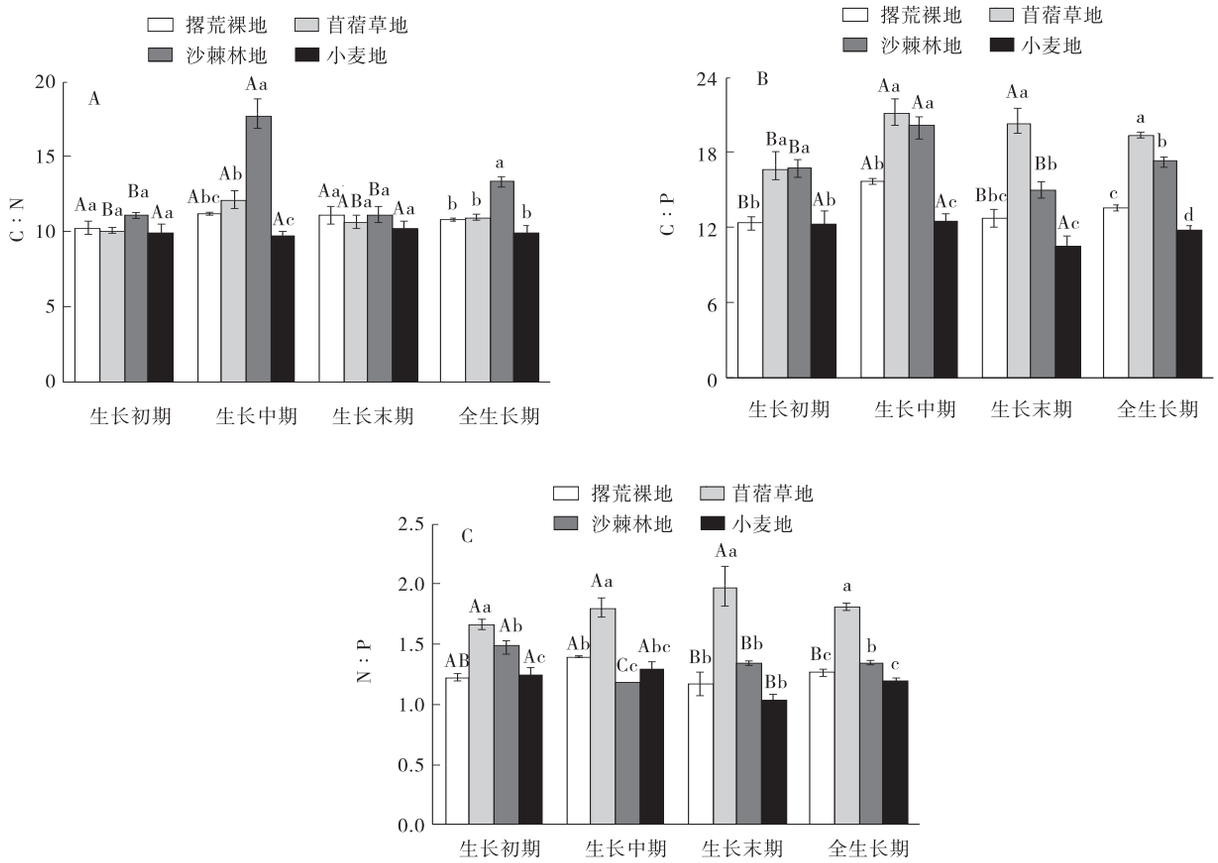

图2　不同土地利用方式下0~40 cm土壤C、N、P化学计量特征

Fig. 2　Chemical stoichiometric characteristics of C, N, and P in 0~40 cm soil under different land use patterns

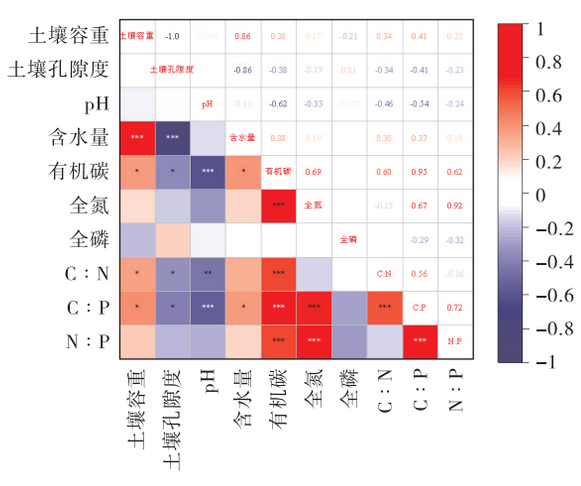

图3　不同土地利用方式下土壤养分间及其与化学计量比的相关关系

Fig. 3　Correlation between soil nutrients and their stoichiometric ratios under different land use patterns

降，并且耕层土壤松弛，土壤孔隙度增大，蓄水力减弱，造成土壤养分流失，最终导致土壤容重减低[29]。此外，小麦的根系能够深入土壤中并释放有机化合物，从而促进土壤微生物活动，增加土壤的通气性，使土壤颗粒松散化，进而增加土壤孔隙度并降低容重。本研究发现，与撂荒裸地相比，苜蓿草地有利于土壤表层含水量的提高，而沙棘林地则更有利于提高土壤深层含水量。与前人研究结果一致[30-31]，这是因为苜蓿草地叶片茂盛，可以在土壤表层形成植被覆盖层，减少土壤表层水分蒸发，保持土壤表层湿度，进而提高土壤含水量[32]。另一方面，苜蓿草地的茂密植被能够有效减少雨水冲击对土壤表层的冲刷，保持土壤完整性，防止水土流失，使水分能够更好地渗透至土壤内部，提高土壤表层含水量[33]。而沙棘林地作为耐旱耐盐碱植物，其根系发达，能深入土壤深层吸收地下水源。同时，沙棘树种具有较强的水分利用效率，能够有效利用土壤水分资源，使土壤中的水分得到有效保持。

3.2　不同土地利用方式对土壤碳氮磷及其化学计量特征的影响

C、N、P元素作为构成土壤养分的基础组成部分[34]，其含量可用以表征区域土壤质量的状况。本研究结果表明，在全生长期中，苜蓿草地土壤SOC、TN含量显著高于其他土地利用方式。与杜佳团等[35]在

黄土高原的研究结果一致。这是因为苜蓿草地自2015年种植,多年生紫花苜蓿其地上部分与根系具有丰富的生物量[36],苜蓿草地生长期间,通过光合作用吸收大量二氧化碳,并将其固定在植物体内,形成有机碳。同时,苜蓿草地根系结构发达,能够深入土壤层,大量吸收和存储氮素,进而提高土壤全氮含量[37]。此外,苜蓿由于生长周期较短,死亡后会快速分解并回归土壤,更有利于土壤碳、氮元素的积累[38]。另一方面,紫花苜蓿为豆科植物,与根瘤菌可以共生固定氮素[39]。固氮作用不仅为苜蓿草地提供了足够的氮素营养,同时也将固定的氮素释放到土壤中并逐渐转化为有机氮,进而提高土壤的全氮含量。本研究结果表明,3种土地利用方式下土壤全磷含量较撂荒裸地相比均有不同程度提高,其中以小麦地最为明显。郭超等[40]研究发现,农田相较于林草地更有利于土壤全磷的积累。Azene等[41]通过对青藏高原不同土地利用变化对土壤磷组分的影响研究发现,农田土壤总磷和无机磷组分显著高于其他土地利用类型。均与本研究结果一致。这是因为小麦作物通常在地表生长和收获,根系相对较浅,土壤全磷无法被深层土壤吸收利用,而是在上部土层积累和持留,导致土壤中TP含量较高。此外,在传统耕作中,通常施用磷肥以满足作物生长需求,磷肥中富含磷元素,长期施用导致土壤中的磷累积量逐渐增加,进而提升土壤TP含量。

不同土地利用方式及生长期变化会导致土壤养分化学计量比存在一定差异,而养分化学计量比是用作表征土壤碳氮磷矿化及土壤内部元素循环的重要指标之一[42]。土壤C:N值是衡量土壤碳氮养分平衡关系的重要指标,反映出土壤微生物对有机质的分解速率。研究表明[43],土壤微生物分解有机质最适宜C:N值为25。本研究中,4种土地利用方式下土壤C:N值均明显小于25,表明该区域不同土地利用方式下土壤有机质分解和矿化速率较快,不利于养分的积累。沙棘林地土壤C:N值显著高于其余土地利用方式,这是由于乔灌植被凋落物通常比草本植物更丰富,有机质含量更高。这些凋落物在分解过程中逐渐释放碳和氮,导致土壤中碳氮比增加[44]。此外,灌丛植物形成的“沃岛效应”[38],可以使灌丛斑块内部增加土壤SOC和TN含量,灌丛土壤氮素循环加快,导致土壤C:N值升高。土壤中的P素对植物生长起着重要作用,土壤C:P值可用来衡量土壤微生物对有机质P元素的释放及从外界吸收转化P素矿化潜力。研究区不同土地利用方式在全生长期下土壤C:P值的范围在11.78~19.35。有研究表明,土壤C:P<200时,土壤中微生物碳含量会迅速增加,4种土地利用方式下的植被生长会受到P元素限制,致使土壤养分的有效性降低[45]。土壤N:P值可用于预测土壤养分限制状况,也是判断土壤N饱和状况的重要指标。本研究结果表明,4种土地利用方式下土壤N:P值均低于全国平均值(5.2)[46],表明该区4种土地利用方式下土壤中N较为匮乏。本研究中,土壤C:P值和N:P值均表现为苜蓿草地>沙棘林地>撂荒裸地>小麦地。这是因为苜蓿草地凋落物有机质含量较高。凋落物在降解分解过程中会释放出C和P,进一步提高了土壤中的C:P和N:P,且苜蓿作为典型固氮植被,更有助于土壤氮素的固存,这与前人研究结果一致[47]。

3.3 不同土地利用方式下土壤性质及其与化学计量比的相关关系

土壤养分含量受到诸多环境因子的共同影响,如降水、土地利用方式、土壤温湿度、土壤质地等。本研究中,土壤SOC与土壤容重及土壤含水量之间均呈显著正相关关系。这是因为有机碳是土壤有机质的重要来源,有机质可以通过形成团聚体和胶结体稳定土壤结构,增加土壤密度和容重从而提高土壤持水能力[48]。与单监利[49]在杭州西溪湿地的研究结果一致,本研究结果同样表明,土壤SOC与土壤孔隙度和土壤pH值均呈负相关关系。这是因为有机碳在分解和降解过程中会释放氢离子,导致土壤pH降低。土壤pH值的降低会影响土壤胶体的电荷和胶体颗粒间的吸附作用,从而减少土壤颗粒间的粘结力,降低土壤孔隙度[50]。陈良帅等[51]在川西高原的研究也证实,土壤pH值与有机碳呈负相关关系,主要原因是酸性环境抑制了微生物的活性,减少了有机碳的分解,从而有助于土壤有机碳积累。相关性分析表明,土壤SOC和TN与土壤C:P和土壤N:P均呈显著正相关关系,且土壤SOC与土壤TN之间也表现为极显著正相关关系,表明氮素在土壤中的分布状况受到有机质的累积和分解速率的影响,与董士伟[52]的研究一致。这是因为有机碳和全氮通常来自相同的原始有机物质,且在土壤中的保持机制相似,可通过与土壤颗粒结合形成

稳定有机质,抵抗微生物降解和物理侵蚀作用[53]。此外,碳、氮元素对同一环境因子的响应同步,且具有较好的耦合关系,表明陇中黄土高原土壤C:N在空间上相对稳定,印证了生态化学计量学的动态平衡理论。

4 结论

通过对黄土高原不同土地利用方式土壤碳氮磷含量及其生态化学计量特征研究发现,土壤有机碳与全氮含量以苜蓿草地最高,全磷含量以小麦地最高,土壤养分化学计量比表明该地区土壤有机质分解和矿化速率较快,不利于养分的积累,且土壤N:P<5.2,土壤养分主要受氮限制。因此,应合理施加氮肥以及外源氮的投入,以进一步减少该区土壤养分流失,提高土壤肥力,实现区域生态修复的目的。

参考文献:

[1] 刘婕,勾晓华,刘建国,等. 甘南黄河流域4种典型林分土壤C、N、P化学计量特征[J]. 生态学报,2023,43(13):5627－5637.

[2] 刘京涛,李安琦,孙景宽,等. 黄河三角洲贝壳堤湿地优势灌木碳、氮、磷化学计量特征[J]. 生态学报,2021,41(10):3805－3815.

[3] 姚卫举,牟晓杰,万斯昂,等. 不同土地利用方式土壤碳、氮、磷、硫含量及其生态化学计量特征[J]. 江苏农业科学,2023,51(17):231－239.

[4] 韩路,冯宇,李沅楷,等. 地下水埋深对灰胡杨叶片与土壤养分生态化学计量特征及其内稳性的影响[J]. 植物生态学报,2024,48:1－11.

[5] Zhang Z, Hou G, Liu M, *et al*. Degradation induces changes in the soil C:N:P stoichiometry of alpine steppe on the Tibetan Plateau[J]. Journal of Mountain Science, 2019,16(10):2348－2360.

[6] 阿的哈则,常涛,秦瑞敏,等. 人工草地土壤碳氮磷含量变化及化学计量特征研究[J]. 草地学报,2024,32(3):1－16.

[7] Sun Y, Wang C, Chen X, *et al*. Phosphorus additions imbalance terrestrial ecosystem C: N: P stoichiometry[J]. Global Change Biology, 2022, 28(24): 7353－7365.

[8] Ouyang W, Xu Y, Hao F, et al. Effect of long－term agricultural cultivation and land use conversion on soil nutrient contents in the Sanjiang Plain[J]. Catena, 2013, 104: 243－250.

[9] Chen H P, Lee M, Chiueh P T. Creating ecosystem services assessment models incorporating land use impacts based on soil quality[J]. Science of The Total Environment, 2021, 773: 145018.

[10] 郭绍义,王红新,刘文彬,等. 升金湖沿湖不同土地利用方式下土壤有机质和养分变化特征[J]. 土壤,2022,54(6):1132－1137.

[11] Ou Y, Quiñónez－Barraza G, Wang C. Effects of Land－Use Types on Topsoil Physicochemical Properties in a Tropical Coastal Ecologically Fragile Zone of South China[J]. Sustainability, 2023, 15(6): 5484.

[12] 苟国花. 青藏高原不同土地利用方式下土壤理化性质及质量评价[D]. 咸阳:西北农林科技大学,2023.

[13] Li C, Zhao L, Sun P, *et al*. Deep Soil C, N, and P Stocks and Stoichiometry in Response to Land Use Patterns in the Loess Hilly Region of China[J]. Plos One, 2016, 11(7): 0159075.

[14] Zhao F Z, Sun J, Ren C J, *et al*. Land use change influences soil C, N and P stoichiometry under 'Grain－to－Green Program' in China[J]. Scientific Reports, 2015, 5(1): 10195.

[15] Wang J, Liu Q Q, Chen R R, *et al*. Soil carbon dioxide emissions in response to precipitation frequency in the Loess Plateau, China[J]. Applied Soil Ecology, 2015, 96: 288－295.

[16] Zhang W, Liu W, Xu M, *et al*. Response of forest growth to C: N: P stoichiometry in plants and soils during Robinia pseudoacacia afforestation on the Loess Plateau, China[J]. Geoderma, 2019, 337: 280－289.

[17] 王晓娇. 不同施肥措施下陇中黄土高原旱作玉米农田生态系统碳平衡及其土壤碳库稳定性研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2021.

[18] 李佳佳,樊妙春,上官周平. 黄土高原南北样带刺槐林土壤碳、氮、磷生态化学计量特征[J]. 生态学报,2019,39(21):7996－8002.

[19] 董政宏,张君红,何佳,等. 土壤微生物网络复杂性预测黄土高原造林恢复生态系统多功能性[J]. 生态学报,2024,44(6):1－17.

[20] 谢佩君,宋小燕,孙文义,等. 基于GEE的黄土高原植被绿度线推移变化研究[J]. 中国环境科学,2023,43(12):6518－6529.

[21] 韩晓佳,王继军,温昕. 退耕区域生态系统服务作用关系的尺度效应及分异机制研究——以安塞区为例[J]. 生态学报,2024,44(5):1－17.

[22] 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.

[23] 夏光辉,郭青霞,卢庆民,等. 黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤养分及生态化学计量特征[J]. 水土保持通报,2020,40(2):140－147＋153.

[24] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000.

[25] Deng L, Wang K, Zhu G, *et al*. Changes of soil carbon in five land use stages following 10 years of vegetation succession on the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2018, 171:185 - 192.

[26] 白一茹,王幼奇,展秀丽. 陕北农牧交错带土地利用方式对土壤物理性质及分布特征的影响[J]. 中国农业科学,2013,46(8):1619－1627.

[27] Yan P, Lin K R, Wang Y R, *et al*. Assessment of Influencing Factors on the Spatial Variability of SOM in the Red Beds of the Nan xiong Basin of China, Using GIS and Geo－Statistical Methods [J]. ISPRS International Journal of Geo－Information, 2021, 10(6):366－379.

[28] Özkan, U, Gökbulak F. Effect of vegetation change from forest to herbaceous vegetation cover on soil moisture and temperature regimes and soil water chemistry [J]. Catena, 2017, 149:158－166.

[29] Orzech K, Wanic M, Załuski D. The Effects of Soil Compaction and Different Tillage Systems on the Bulk Density and Moisture Content of Soil and the Yields of Winter Oilseed Rape and Cereals [J]. Agriculture, 2021, 11:666.

[30] 蓝家程,傅瓦利,甄晓君,等. 岩溶山区土壤性质及其对土下溶蚀速率的影响[J]. 水土保持学报,2011,25(2):58－62.

[31] 郭连金. 黄土丘陵区沙棘和小叶杨人工林群落稳定性研究[D]. 咸阳:西北农林科技大学,2006.

[32] 尹亚丽,王玉琴,李世雄,等. 三江源区退化高寒草甸土壤微生物群落季节特征研究[J]. 生态环境学报,2018,27(10):1791－1800.

[33] 马婧怡,贾宁凤,程曼. 黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤水分变化特征[J]. 生态学报,2018,38(10):3471－3481.

[34] 贾培龙,安韶山,李程程,等. 黄土高原森林带土壤养分和微生物量及其生态化学计量变化特征[J]. 水土保持学报,2020,34(1):315－321.

[35] 杜佳团,李广,马维伟,等. 黄土丘陵区 4 种典型植被土壤可溶性氮组分特征[J]. 水土保持学报,2021,35(6):251－257.

[36] 张荟荟,张学洲,梁维维,等. 粮草轮作对北疆平原荒漠灌区土壤理化性质的影响[J]. 草原与草坪,2021,41(4):128－133.

[37] 丁婷婷,段廷玉. 果园绿肥对果树－土壤－微生物系统影响研究进展[J]. 果树学报,2021,38(12):2196－2208.

[38] 何玉姣,陈婵,朱小叶,等. 湘中丘陵区不同植被恢复阶段林地土壤可溶性氮组分含量和密度[J]. 水土保持学报,2021,35(2):258－264.

[39] Yuan Z Q, Yu K L, Epstein H E, *et al*. Effects of legume species introduction on vegetation and soil nutrient development on abandoned croplands in a semi－arid environment on the Loess Plateau, China[J]. Science of the Total Environment, 2016, 541:692－700.

[40] 郭超,盛茂银,何宇,等. 土地利用方式对西南喀斯特土壤碳、氮、磷化学计量特征及酶活性的影响[J]. 土壤通报,2023,54(2):382－391.

[41] Azene B, Qiu P, Zhu R H, *et al*. Response of soil phosphorus fractions to land use change in the subalpine ecosystems of Southeast margin of Qinghai－Tibet Plateau, Southwest China [J]. Ecological Indicators, 2022, 144:109432.

[42] 秦娟,孔海燕,刘华. 马尾松不同林型土壤 C、N、P、K 的化学计量特征. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2016,44(2):68－76,82.

[43] 张剑,宿力,王利平,等. 植被盖度对土壤碳、氮、磷生态化学计量比的影响——以敦煌阳关湿地为例[J]. 生态学报,2019,39(2):580－589.

[44] 闫宝龙,吕世杰,王忠武,等. 草地灌丛化成因及其对生态系统的影响研究进展[J]. 中国草地学报,2019,41(2):95－101.

[45] 吴鹏,崔迎春,赵文君,等. 喀斯特森林植被自然恢复过程中土壤化学计量特征[J]. 北京林业大学学报,2019,41(3):80－92.

[46] 吴清林,梁虹,熊康宁,等. 喀斯特地区水土漏失监测方法评述[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版),2020,38(3):30－38.

[47] 闫丽娟,王海燕,李广,等. 黄土丘陵区 4 种典型植被对土壤养分及酶活性的影响[J]. 水土保持学报,2019,33(5):190－196＋204.

[48] 岳祥飞,李衍青,刘鹏. 广西岩溶区灌木林地凋落物——土壤碳、氮、磷化学计量特征[J]. 中国岩溶,2023,42(5):1106－1116.

[49] 单监利,龚梦丹,顾优丽,等. 杭州城市湿地沉积物碳、氮垂向分布特征研究[J]. 湿地科学与管理,2013,9(4):51－55.

[50] 刘萌. 祁连山半干旱区不同土地利用方式下土壤理化特

性及草地生产力研究[D]. 咸阳:西北农林科技大学,2023.

[51] 陈良帅,黄新亚,薛丹,等. 川西高原泥炭沼泽土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. 应用与环境生物学报,2022,28(2):267－275.

[52] 董士伟,李红,张微微,等. 北京山区农田土壤有机质对土壤呼吸的影响研究[J]. 湖北农业科学,2015,54(20):4982－4984.

[53] 朱秋莲. 黄土丘陵区不同植被带立地条件对植物—枯落物—土壤生态化学计量特征的影响[D]. 咸阳:西北农林科技大学,2013.

The soil carbon,nitrogen,and phosphorus content, and their ecological stoichiometric characteristics under different land use patterns in the Loess Plateau of Longzhong

ZHNAG Chen[1],LI Guang[2*],LU Wen-de[2],DENG Xin-shan[2],YANG Juan-juan[2]

(1. *School of Information Science and Technology*, *Gansu Agricultural University*, *Lanzhou* 730070, *China*;
2. *College of Forestry*, *Gansu Agricultural University*, *Lanzhou* 730070, *China*)

Abstract:【Objective】To investigate the response of soil carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) contents and their stoichiometric characteristics to different land use modes in the Loess Plateau of Longzhong. 【Method】Soils from four land use modes-sea buckthorn woodland, alfalfa grassland, abandoned bare land, and wheat land - were selected to determine the soil C, N, and P contents and their associated physicochemical properties. 【Result】The differences in soil physicochemical properties among these four land－use modes were significant ($P<0.05$). The highest soil bulk density was found in sea buckthorn woodland, while wheat farmland had the highest soil porosity and pH, and the lowest soil water content. Soil organic carbon (SOC) content followed the order: alfalfa grassland > sea buckthorn woodland >abandoned bare land> wheat land. Soil total nitrogen (TN) content ranked as: r alfalfa grassland > sea buckthorn woodland > wheat land >abandoned bare land, while soil total phosphorous (TP) content varied from wheat land > sea buckthorn woodland > alfalfa grassland >abandoned bare land. During the full－growth period, the C∶N of sea buckthorn woodland was higher than that of the other three land uses by 21.93%～33.70%, and the differences were significant ($P<0.05$), while both C∶P and N∶P were highest in alfalfa grassland. In comparison to abandoned bare land, soil C∶P and N∶P in alfalfa grassland increase by 42.21% and 42.83%, respectively. Correlation analysis revealed a significant positive correlation ($P<0.001$) between SOC and TN with both soil C∶P and N∶P ratios, while there are no significant correlations between soil TP and SOC, TN, and stoichiometric characteristics. 【Conclusion】Overall, alfalfa grassland demonstrates strong potential for short－term improvement tof soil nutrient accumulation, characterized by high SOC and TN levels and a good balance of stoichiometric characteristics. However, further in-depth studies are needed to determine whether these benefits can be sustained over the long term.

Key words: carbon, nitrogen, and phosphorus; ecological stoichiometry; the Loess Plateau of Longzhong; land use pattern

(责任编辑:康宇坤)