

山西土石山区 3 种草本植物根拉拔特性

张超波, 周霞, 李东嵘, 蒋静, 魏杨

(太原理工大学, 太原 030024)

摘要: 为了解山西省土石山区固土护坡草本植物根系拉拔特性, 筛选拉拔力优势草本植物物种进行水土流失防治, 通过开展根系原位拉拔力学试验, 研究了 3 种典型草本植物香根草(*Vetiveria zizanioides* L.)、百喜草(*Paspalum notatum* Flugge)、黑麦草(*Lolium perenne* L.) 根系拉拔力随根径和土层深度的变化规律。结果显示: 3 种草本植物根系拉拔力随着根径的增大而增加, 且拉拔力与根径之间满足幂函数关系; 整体上, 根系拉拔力从大到小顺序表现为香根草 > 黑麦草 > 百喜草, 而且三者之间差异显著; 但在 $D \leq 0.4$ mm 和 $D > 0.4$ mm 两个根径组下, 黑麦草均表现出较好的拉拔力性能。在 0—10 cm, 10—20 cm 两个土层间, 香根草和百喜草两种植物根系拉拔力性能相似, 而黑麦草单根拉拔力在表层土壤发挥效果优于下层土壤。从单根拉拔力方面出发, 黑麦草在 3 种植物中可优先考虑用于固持浅表层土壤。试验探究了草本植物单根在不同根径组下和土层深度下的抗拔性能, 研究结果可为山西省土石山区水土保持植物措施草本植物物种选择提供理论依据。

关键词: 水土保持; 土石山区; 草本植物; 根系; 拉拔力

中图分类号: S157; S727.22

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)03-0300-05

Root Pullout Properties of Three Slope-Protecting Herbaceous Plants in Earth-Rock Mountain Area in Shanxi Province

ZHANG Chaobo, ZHOU Xia, LI Dongrong, JIANG Jing, WEI Yang

(Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to understand root pullout properties of the herbaceous plants and to select proper species for soil and water conservation in earth-rock mountain area in Shanxi Province, root pullout forces of three plant species, *Vetiveria zizanioides* L., *Paspalum notatum* Flugge and *Lolium perenne* L. were studied by in-situ root pullout tests. The results showed that root pullout forces increased with root diameter and the relationships between root pullout force and root diameters of the three herbaceous plants could be described by power function; the root pullout forces of the three herbaceous plants decreased in the order: *Vetiveria zizanioides* L. > *Lolium perenne* L. > *Paspalum notatum* Flugge, and the differences between them were significant; in $D \leq 0.4$ mm and $D > 0.4$ mm root groups, *Lolium perenne* L. showed better pullout property; root pullout forces of *Vetiveria zizanioides* L. and *Paspalum notatum* were similar in 0—10 cm and 10—20 cm soil layers, while that of *Lolium perenne* L. was more effective in 0—10 cm soil layer than 10—20 cm soil layer; according to root pullout force, *Lolium perenne* L. was a priority among the three species in terms of reinforcing shallow soil with herbaceous plant. The root pullout properties of the three herbaceous plants under different root diameter groups and soil depths were studied, and the results could provide theoretic basis for selecting herbaceous species for soil and water conservation in earth-rock mountain area in Shanxi Province.

Keywords: soil and water conservation; earth-rock mountain area; herbaceous plants; roots; pullout force

北方土石山区作为我国水土流失的一个重要类型区,因区内土层薄、水土流失危害大而受到长期关注^[1]。植物措施作为防治水土流失的主要措施之一,对于我国生态文明建设非常重要。近年来,植物根系固土护坡的力学效应受到广泛关注和研究^[2]。一般认为,覆盖植被的土体发生浅表层滑动时,滑动土体和根系均发生变形,由于在变形模量方面土壤与根系之间有较大差异,二者出现相互错动或相互错动趋势。这种错动或错动趋势被二者之间的摩擦阻力所抵抗,使得滑移面附近土体中产生的剪应力部分转移给植物根系,转化为根系的拉应力^[3-4]。因此,植物根系固土护坡过程中发挥的抗拉和抗拔性能是固持水土的重要力学性能和指标。根系原位拉拔试验和室内拉伸试验是研究根系抗拔和抗拉力学性能的主要手段^[5]。原位拉拔试验,开展较多的是针对整株植物的拉拔,测定的是植株被拔出时的最大抗拔力^[6-9],一般称为植株抗拔力^[10],而且原位拉拔较多针对乔灌木根系^[11-16],草本植物根系开展较多集中在室内拉伸试验,缺少针对土石山区草本植物单根开展的原位拉拔试验,而且对于草本植物根系拉拔力与根径和土层深度等影响因素的关系尚不清楚。

本文通过开展根系原位拉拔力学试验,研究了山西省土石山区3种典型草本植物香根草(*Vetiveria zizanioides* L.)、百喜草(*Paspalum notatum* Flugge)、黑麦草(*Lolium perenne* L.)根系的拉拔力,以及其随根径和土层深度的变化规律。研究结果可为实际生态固土工程中草本植物的种植和选择提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

原位拉拔试验所需植物根系位于山西省太原市西北24 km处的崛围山区,该山呈南北走向,平均海拔1 352 m,地理位置介于112°25.628'—112°26.469'E, 37°57.821'—37°58.108'N。属于暖温带大陆性季风气候类型。全年平均有130~150 d的无霜期,早晚、昼夜温差较大,年平均温度7~10℃,最低气温可达-28℃,最高气温可达40℃。全年日照时间约为2 400—2 600 h,降雨主要集中在7—9月份。年平均降水量约为470 mm。崛围山植被以油松、侧柏和黄栌等林木和香根草、黑麦草和百喜草等草本为主^[17]。该区地表水均属黄河流域汾河水系,汾河一级支流泥屯河、柏板河、杨兴河、涧河均在区内汇入汾河。平均地表水资源510万m³,地下水资源为3 891万m³,全区水资源总量为4 057万m³。

1.2 试验仪器

本试验以研究区广泛分布的香根草、黑麦草和百喜草3种草本植物根系为研究对象,测定其拉拔力。试验仪器包括:(1)根径测量:电子游标卡尺,精度为0.01 mm;(2)根长及土层深度测量:卷尺,精度为1 mm;(3)单根拉拔力:测力计,测力量程为0~100 N,精度为0.05 N;(4)野外根系挖掘采用的其他仪器与工具:刷子、铁铲和铁锹等。

1.3 单根原位拉拔试验

选择生长状况良好植株,以植株为中心,用铁锹和铁铲等工具环向开挖植株附近土壤剖面。露出单根后,为避免开挖过程对根部产生破坏,采用刷子和小铲进一步清理单根周边土壤,直至单根一端外露长度5 cm左右。利用电子游标卡尺测量根样3个不同位置直径,取其平均值作为根样直径。用测力计夹住单根一端,然后横向匀速拉拔,直至根样拔断,记录对应测力计读数,获得单根拉拔力。根据研究区土层厚度较薄和草本植物根系分布较浅的特点,开挖土壤剖面深度分为0—10 cm和10—20 cm两层。

1.4 数据分析

数据统计分析采用SPSS 16.0 for Windows软件(SPSS, Chicago, IL, USA)。不同变量之间关系采用幂函数回归分析。3种植物间根径和拉拔力差异显著性检验采用方差分析(ANOVA)。同一根径组下,不同深度间根径和拉拔力差异显著性检验采用独立样本T检验(Independent-Samples T test)。采用Excel 2007(Microsoft Corporation)制图。

2 结果与分析

2.1 3种植物整体拉拔力结果

3种草本植物单根拉拔力测试成功单根样本总数为568。由表1可知,香根草根径范围为0.05~0.78 mm,百喜草根径范围为0.07~0.67 mm,黑麦草根径范围为0.05~0.58 mm。香根草平均根径(0.43 mm)显著高于百喜草(0.31 mm)和黑麦草(0.29 mm)($p<0.05$);香根草单根平均拉拔力(7.94 N)也显著高于黑麦草(5.75 N)和百喜草(4.62 N)。尽管百喜草和黑麦草之间平均根径无显著性差异($p=0.39$),但单根平均拉拔力黑麦草(5.75 N)要显著高于百喜草(4.62 N)。

2.2 不同深度下草本植物单根拉拔力与根径幂函数关系

由图1可知,在0—10 cm,10—20 cm土层中,单根拉拔力均随根径增加而增大,且两者之间满足幂函数 $F=aD^b$ 关系。幂函数相关常数见表2。常数 b 值越大,表明幂函数曲线更陡,拉拔力随根径增加而

增大的速度越快。相比 10—20 cm 土层,0—10 cm 土层的香根草和百喜草单根拉拔力随根径增大而增长速度更快,而黑麦草单根拉拔力随根径增大而增长

速度在两个土层中基本相同。据单根拉拔力与根径之间幂函数关系(表 2)推测,本文 3 种植物小于 0.1 mm 单根拉拔力均小于 2 N。

表 1 草本植物单根拉拔力

植物	样本数	根径/mm			拉拔力/N		
		范围	平均值	标准偏差	范围	平均值	标准偏差
香根草	189	0.05~0.78	0.43a	0.19	0.14~20.10	7.94a	5.05
百喜草	180	0.07~0.67	0.31b	0.14	0.27~11.70	4.62b	2.95
黑麦草	199	0.05~0.58	0.29b	0.12	0.60~14.60	5.75c	3.43

注:根径和拉拔力平均值列不同小写字母表示三组植物之间在 $p<0.05$ 水平下有显著性差异,下表和下图同。

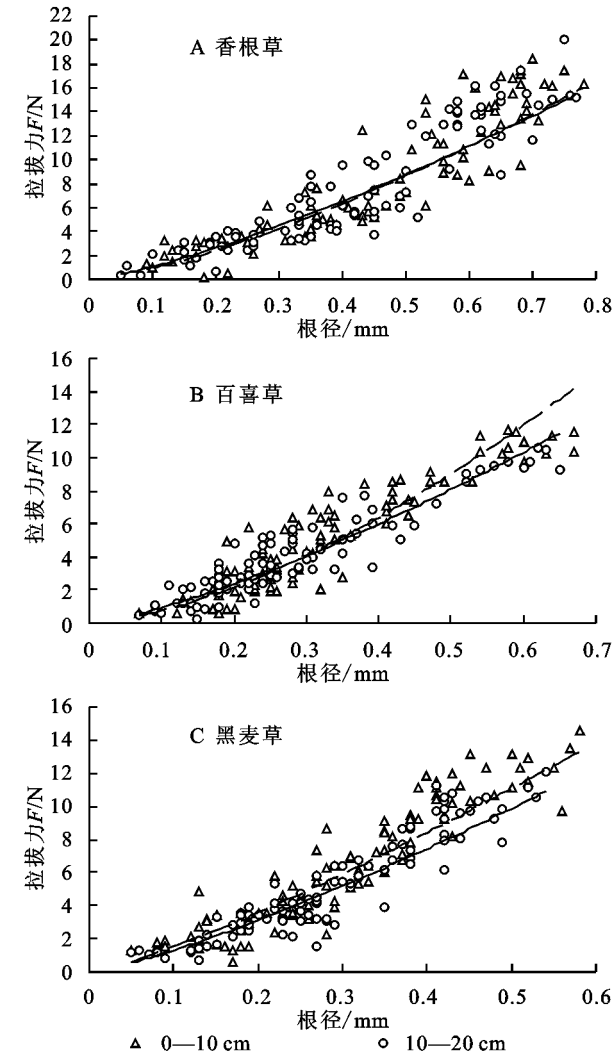


图 1 草本植物单根拉拔力与根径关系

表 2 不同深度下草本植物单根拉拔力(F ,N)与根径(D ,mm)幂函数 $F=aD^b$ 关系

植物	土层深度/cm	数量	参数 a	参数 b	判定系数 R^2
香根草	0—10	90	22.63	1.39	0.73
	10—20	109	21.84	1.32	0.84
百喜草	0—10	85	26.46	1.55	0.78
	10—20	95	20.47	1.34	0.76
黑麦草	0—10	100	26.09	1.24	0.78
	10—20	99	23.65	1.26	0.84

2.3 不同根径组下不同深度草本植物单根拉拔力与根径差异显著性对比关系

本研究中植物根系直径范围为 0.05~0.80 mm,将根系分为两组进行对比,0.4 mm 接近根径范围中间值且完整,因此根径分组按 0.4 mm 划分。由图 2 可知; $D\leq 0.4$ mm 根径组下,香根草直径显著高于百喜草和黑麦草,但拉拔力却没有显著高于百喜草和黑麦草,甚至稍低于黑麦草;百喜草和黑麦草根径没有显著差异,但黑麦草单根拉拔力显著高于百喜草。表明 $D\leq 0.4$ mm 时,黑麦草单根拉拔力最高。 $D>0.4$ mm 根径分组下,平均根径大小顺序为香根草>百喜草>黑麦草,且三者之间根径差异显著;香根草和黑麦草单根拉拔力显著高于百喜草,香根草和黑麦草之间单根拉拔力无显著差异。表明 $D>0.4$ mm 时,黑麦草单根拉拔力性能较好,香根草次之,百喜草单根拉拔力三者中最弱。

根径 $D\leq 0.4$ mm 和 $D>0.4$ mm 两个组间,3 种植物的根径和拉拔力均是 $D>0.4$ mm 组高于 $D\leq 0.4$ mm 组,这是因为单根拉拔力受根径尺寸效应影响(图 1)。因此,单根拉拔力的比较需在根径无显著差异情况下开展。比较同一根径组下、不同土层间根径和拉拔力结果可知(表 3):3 种植物在 $D\leq 0.4$ mm 和 $D>0.4$ mm 两个根径组下,0—10 cm,10—20 cm 两个土层间根径没有显著差异。除了百喜草单根在 $D>0.4$ mm 组下,0—10 cm 土层根径稍小于 10—20 cm 土层根径外,其他分组下,均是 0—10 cm 土层根径稍大于 10—20 cm 土层根径。黑麦草单根在 $D\leq 0.4$ mm 和 $D>0.4$ mm 两个根径组下,0—10 cm,10—20 cm 两个土层间拉拔力均出现显著差异,即 0—10 cm 土层拉拔力均显著高于 10—20 cm 土层。香根草和百喜草单根在两个根径组下,0—10 cm,10—20 cm 两个土层间拉拔力未出现显著差异,表明香根草和百喜草两种植物单根在两个土层内拉拔力特性相似,而黑麦草单根拉拔力在表层土壤优于下层土壤。

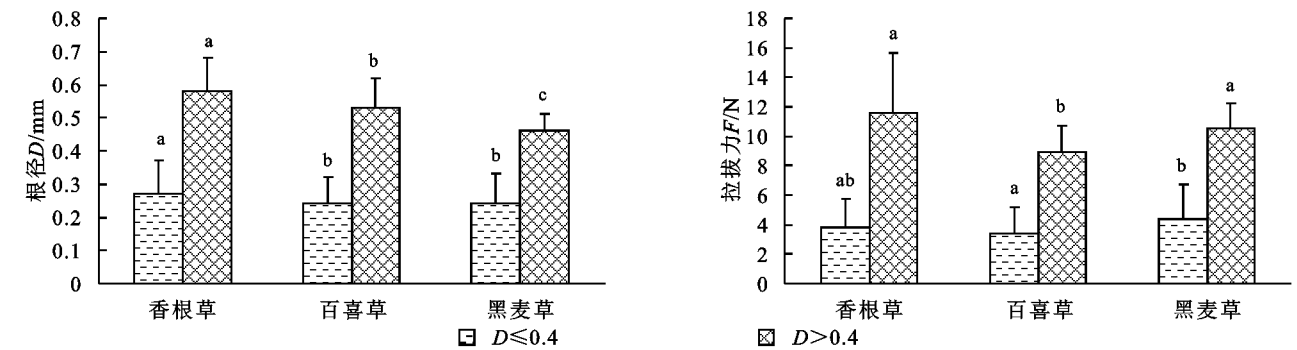


图 2 不同根径组下草本植物单根根径 D (mm)和拉拔力 F (N)

表 3 不同根径组 and 不同土层下草本植物单根根径 D (mm)和拉拔力 F (N)

植物	根径 分组	土层 深度/cm	样本数	根径/ mm	拉拔力/ N
香根草	$D \leq 0.4$ mm	0—10	40	$0.27 \pm 0.10a$	$3.82 \pm 1.83a$
		10—20	49	$0.26 \pm 0.10a$	$3.82 \pm 2.05a$
	$D > 0.4$ mm	0—10	50	$0.59 \pm 0.10a$	$11.91 \pm 4.09a$
		10—20	50	$0.57 \pm 0.10a$	$11.31 \pm 3.96a$
百喜草	$D \leq 0.4$ mm	0—10	59	$0.25 \pm 0.07a$	$3.62 \pm 2.03a$
		10—20	81	$0.23 \pm 0.08a$	$3.21 \pm 1.67a$
	$D > 0.4$ mm	0—10	26	$0.52 \pm 0.09a$	$9.16 \pm 1.75a$
		10—20	14	$0.54 \pm 0.08a$	$8.55 \pm 1.78a$
黑麦草	$D \leq 0.4$ mm	0—10	76	$0.25 \pm 0.09a$	$4.77 \pm 2.56a$
		10—20	78	$0.24 \pm 0.09a$	$3.94 \pm 2.10b$
	$D > 0.4$ mm	0—10	24	$0.47 \pm 0.06a$	$11.34 \pm 1.52a$
		10—20	21	$0.45 \pm 0.04a$	$9.66 \pm 1.39b$

注:表中根径和拉拔力数值为平均值±标准偏差,每行数值后不同小写字母表示同一植物和根径组下不同深度两组之间在 $p<0.05$ 水平下有显著性差异。

3 结论与讨论

由于 3 种植物原位单根拉拔力试验结果较少,本文将所测 3 种植物拉拔力结果与已发表的单根室内拉伸抗拉力结果(表 4)对比可知^[17-19]:香根草单根抗拉力是拉拔力的 1.5~3.1 倍;百喜草单根抗拉力是拉拔力的 1.1~2.0 倍;黑麦草单根抗拉力是拉拔力的 0.8~2.0 倍。因为根系直径范围不一致,根系抗拉力会随根径增加而增大,表 4 中根系抗拉力对应根系直径明显粗于本研究根系直径,因此从现有结果尚无法得出同一植物根系抗拉力一定高于拉拔力的结论。

表 4 草本植物单根抗拉力

植物	抗拉力/ N	根径 范围/mm	根径 平均值/mm
香根草	25.00	0.2~1.7	0.66
	16.26	0.2~1.0	0.65
百喜草	8.99	0.6~0.8	0.73
	4.89	0.1~0.4	0.23
黑麦草	4.72	0.2~1.5	0.60
	11.73	0.2~1.0	0.56

3 种草本植物单根拉拔力随着根径的增大而增加,且拉拔力与根径之间满足幂函数关系。这种幂函数关系同根系抗拉力与根径之间幂函数关系非常相似,主要原因可能也在于根系主要化学组分含量的不同^[20-21];相比 10—20 cm 土层,0—10 cm 土层的香根草和百喜草单根拉拔力随根径增大而增长速度更快,而黑麦草单根拉拔力随根径增大而增长速度在两个土层中基本相同。根径作为根系横向尺寸,其一定程度直观地反应了根系拉拔力学性能。本文小于 0.1 mm 的根系研究数量较少,一方面在于其数量较少较短;另一方面其拉拔力极低,虽然小于 0.1 mm 根系通过根系分泌物粘结土壤,对于固土起着不可忽略作用,但由于其木质化程度非常低,力学性能较 0.1 mm 以上毛根和细根低得多,轻微土壤扰动甚至流水冲刷就能将其破坏^[22]。

整体上,单根拉拔力从大到小顺序表现为香根草>黑麦草>百喜草,而且三者之间差异显著;但在 $D \leq 0.4$ mm 和 $D > 0.4$ mm 两个根径组下,黑麦草均表现出较好的拉拔力性能。在 0—10 cm,10—20 cm 两个土层间,香根草和百喜草两种植物单根拉拔力性能相似,而黑麦草单根拉拔力在表层土壤发挥效果优于下层土壤。

因此,从单根拉拔力角度考虑,3 种植物中可优先选择黑麦草用于草本植物措施固持浅表层土壤。本试验探究了草本植物在不同根径组下和土层深度下的单根抗拔性能,研究结果可为北方土石山区水土保持植物措施草本植物物种选择提供理论依据。

参考文献:

[1] 李秀彬,马志尊,姚孝友,等. 北方土石山区水土流失现状与综合治理对策[J]. 中国水土保持科学,2008,6(1): 9-15.

[2] 陆桂红,杨顺,王钧,等. 植物根系固土力学机理的研究进展[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2014,38(2): 151-156.

[3] Hales T C, Miniati C F. Soil moisture causes dynamic adjustments to root reinforcement that reduce slope stability[J]. Earth Surface Processes and Landforms,

- 2017,42(5):803-813.
- [4] 周跃,陈晓平,李玉辉,等. 云南松侧根对浅层土体的水平牵引效应的初步研究[J]. 植物生态学报,1999,23(5):458-465.
- [5] Stokes A, Norris J E, van Beek L P H, et al. How vegetation reinforces the soil on slopes[C]// Stokes A, Norris J, Mickovski SB, et al. Slope stability and erosion control: ecotechnological solutions. New York: Springer, 2008: 65-118.
- [6] 李国荣,胡夏嵩,毛小青,等. 寒旱环境黄土区灌木根系护坡力学效应研究[J]. 水文地质工程地质,2008,35(1):94-97.
- [7] 李臻,余芹芹,杨占风,等. 西宁盆地两种灌木植物原位拉拔试验及其护坡效应[J]. 水土保持研究,2011,18(3):206-209.
- [8] 胡夏嵩,陈桂琛,周国英,等. 青藏铁路沱沱河段路基边坡植物护坡根系力学强度试验研究[J]. 水文地质工程地质,2012,39(1):107-113.
- [9] 夏振尧,张伦,陈毅,等. 香根草根系与土壤接触特性及抗拔模型研究[J]. 水生态学杂志,2016,37(4):36-41.
- [10] 李绍才,孙海龙,杨志荣,等. 护坡植物根系与岩体相互作用的力学特性[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(10):2051-2057.
- [11] 张兴玲,胡夏嵩,毛小青,等. 青藏高原东北部黄土区护坡灌木柠条锦鸡儿根系拉拔摩擦试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(S2):3739-3745.
- [12] 罗春燕,吴楚,芦光新,等. 三江源区植物根—土复合体的抗拉拔力特征及影响因素分析[J]. 水土保持研究,2014,21(5):260-266,271.
- [13] 田佳,曹兵,及金楠,等. 防风固沙灌木花棒沙柳根系生物力学特性[J]. 农业工程学报,2014,30(23):192-198.
- [14] 郑力文,刘小光,涂志华,等. 油松群根与土壤界面摩擦特性研究[J]. 水土保持学报,2014,28(1):84-87.
- [15] 管世烽,夏振尧,张伦,等. 水平荷载作用下多花木蓝根系拉拔试验研究[J]. 长江科学院院报,2016,33(6):24-28.
- [16] 王桂尧,胡圣辉,张永杰,等. 小乔木根系根土间作用力的室外拉拔试验研究[J]. 水文地质工程地质,2017,44(6):64-69.
- [17] 欧阳前超,魏杨,周霞,等. 土石山区护坡草本植物根系抗拉力学特性[J]. 中国水土保持科学,2017,15(4):35-41.
- [18] 程洪,张新全. 草本植物根系网固土原理的力学试验探究[J]. 水土保持通报,2002,22(5):20-23.
- [19] 袁雪红,高照良,张翔,等. 护坡植物根系分布及抗拉力学特性[J]. 南水北调与水利科技,2016,14(5):117-123.
- [20] Zhang C, Chen L, Jiang J. Why fine tree roots are stronger than thicker roots: The role of cellulose and lignin in relation to slope stability[J]. Geomorphology, 2014,206:196-202.
- [21] 朱锦奇,王云琦,王玉杰,等. 根系主要成分含量对根系固土效能的影响[J]. 水土保持通报,2014,34(3):166-170,177.
- [22] 刘国彬,蒋定生,朱显谟. 黄土区草地根系生物力学特性研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1996,2(3):21-28.



(上接第299页)

- [13] 李然嫣,陈印军. 东北典型黑土区农户耕地保护利用行为研究:基于黑龙江省绥化市农户调查的实证分析[J]. 农业技术经济,2017,36(11):80-91.
- [14] 王昕,陆迁. 农户生态行为影响因素的实证分析[J]. 华中农业大学学报:社会科学版,2011,31(3):43-46.
- [15] 马聪,刘黎明,袁承程,等. 快速城镇化地区农户生计资本分化特征及其对生计策略的影响:以上海市青浦区为例[J]. 农业现代化研究,2018,39(2):316-324.
- [16] 郭秀丽,周立华,陈勇,等. 典型沙漠化地区农户生计资本对生计策略的影响:以内蒙古自治区杭锦旗为例[J]. 生态学报,2017,37(20):6963-6972.
- [17] 邝佛缘,陈美球,鲁燕飞,等. 生计资本对农户耕地保护意愿的影响分析:以江西省587份问卷为例[J]. 中国土地科学,2017,31(2):58-66.
- [18] 徐建英,孔明,刘新新,等. 生计资本对农户再参与退耕还林意愿的影响:以卧龙自然保护区为例[J]. 生态学报,2017,37(18):6205-6215.
- [19] 彭清,王成,邓春. 承包农户耕地转出潜力及空间组织经营模式:基于农户生计资本视角[J]. 资源科学,2017,39(8):1477-1487.
- [20] 段伟,马奔,秦青,等. 基于生计资本的农户生态保护行为研究[J]. 生态经济,2016,32(8):180-185.
- [21] 崔晓明,杨新军. 旅游地农户生计资本与社区可持续发展研究:以秦巴山区安康一区三县为例[J]. 人文地理,2018,33(2):147-153.
- [22] 张焱,罗雁,冯璐. 滇南跨境山区农户生计资本的测量开发及因子分析[J]. 经济问题探索,2017,38(8):134-143.
- [23] 伍艳. 贫困山区农户生计资本对生计策略的影响研究:基于四川省平武县和南江县的调查数据[J]. 农业经济问题,2016,37(3):88-94.