

彭石磊, 何丙辉, 王润泽, 等. 自然降雨条件下不同施肥模式和耕作方式对坡耕地紫色土肥力质量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(4): 318-326.

PENG Shi-lei, HE Bing-hui, WANG Run-ze, et al. Effect of soil fertility quality based on different fertilization and tillage patterns in slope cropland of purple soil under natural rainfall[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(4): 318-326.

自然降雨条件下不同施肥模式和耕作方式 对坡耕地紫色土肥力质量的影响

彭石磊, 何丙辉*, 王润泽, 唐柄哲

(西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

摘要:为探讨自然降雨条件下不同施肥模式和耕作方式对坡耕地紫色土肥力质量的影响,通过采集监测时长为9年的径流小区径流和土样,测定了径流量、有机质、全氮、全磷、全钾、速效磷、硝态氮和铵态氮等指标,运用灰色关联法建立了土壤肥力质量评价指标体系,分析了土壤肥力水平与施肥模式、耕作方式之间的关系。结果表明:5种不同试验处理下,各土壤肥力因子均有不同程度下降,其中土壤硝态氮和铵态氮含量减少最为显著;评价土壤肥力的关联度逐年减小,横坡耕作单施化肥处理的多年平均关联度表现最大,对应的多年平均径流量最小;顺坡耕作方式下,农家肥和化肥配施处理的多年平均关联度最大,对应的多年平均径流量最小,对照处理则相反;多年平均径流量与多年平均关联度之间满足线性函数模型 $y = -0.0002x + 0.7628$ ($R^2 = 0.7484$),随着径流量的增大,土壤肥力质量显著下降,二者呈负相关关系。横坡耕作下农家肥和化肥配施处理对于维持土壤肥力水平以及减少地表径流量效果最优。

关键词:施肥模式;耕作方式;土壤肥力评价;紫色土;自然降雨

中图分类号:S147.3

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2018)04-0318-09

doi: 10.13254/j.jare.2018.0045

Effect of soil fertility quality based on different fertilization and tillage patterns in slope cropland of purple soil under natural rainfall

PENG Shi-lei, HE Bing-hui*, WANG Run-ze, TANG Bing-zhe

(College of Resources and Environmental Science, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: In order to explore the effect of different fertilization modes and tillage patterns on the quality of purple soil fertility in sloping cultivated land under natural rainfall conditions, the runoff and soil samples were collected, which based on the research on the experimental data with 9 years from runoff plots. The runoff volume, organic matter, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, available phosphorus, nitrate nitrogen and ammonium nitrogen were measured exposure to different fertilization modes and tillage patterns. The evaluation index system of soil fertility quality was established by grey correlation method, and the relationship between soil fertility level, fertilization modes and cultivation modes were analyzed. The results indicated that under the 5 different treatments, all soil fertility factors decreased in different degrees. Among them, the decrease of soil nitrate nitrogen and ammonium nitrogen was most significant. The correlation degree of soil fertility evaluation decreased year by year, and the average annual correlation degree of single cropping with chemical fertilizer under cross slope tillage was the largest, and the corresponding annual mean runoff was the smallest. Under sloping tillage, the average annual correlation of farm manure and chemical fertilizer treatment was the largest, and the corresponding annual average runoff was the smallest, and the control treatment was the opposite. The relation between the average runoff and the average correlation degree fitted linear model ($y = -0.0002x + 0.7628$, $R^2 = 0.7484$), with increase of runoff, soil fertility quality significantly decreased. The treatment of cross slope tillage with farmyard manure and chemical fertilizer was better for maintaining soil fertility level and reducing surface runoff.

Keywords: fertilization pattern; farming methods; soil fertility assessment; purple soil; natural rainfall

收稿日期:2018-02-28 录用日期:2018-04-11

基金项目:农业部公益性行业科研项目(201003014-6-3)

作者简介:彭石磊(1992—),男,湖南岳阳人,硕士研究生,主要从事城市水土保持研究。E-mail:1016462652@qq.com

*通信作者:何丙辉 E-mail:hebinghui@yahoo.com.cn

三峡库区土壤主要为中生代紫色砂(页)岩风化而成的紫色土,占耕地面积的 78%^[1],且其中绝大部分为坡耕地^[2],库区雨季降水量集中,且多暴雨,容易导致水土流失的发生和加剧,加之不合理地施用肥料、农药等化学物质,产生严重的农业面源污染问题^[3-4],直接威胁着库区的生态安全和经济发展。降雨是引起地表径流并造成水土流失的主要原因之一,农田地表产流量与降雨量、降雨强度、降雨类型、前期雨量等水文因素密切相关。水土流失不仅是水分和泥沙的流失,同时还伴有严重的土壤养分流失。许多学者开展了坡耕地径流小区试验,主要集中在地表径流中氮磷流失分布^[4-6],且多采用模拟降雨的方法,自然降雨条件下则重点探讨了降雨与地表径流中的氮磷流失量的关系^[7-10],很少关注土壤的本底养分性质变化,且前人研究仅考虑土壤氮、磷的地表流失,而忽视了其深层耗损,对土壤氮、磷损失的认识不够全面^[11]。土壤肥力是土壤的主要功能和本质属性^[12],是农业可持续发展的基础^[13],施肥模式和耕作方式都是重要的农业措施,合理的农业耕作和施肥措施可以减少因水土流失导致的面源污染,同时提高作物产量,维持坡耕地土壤质量。施用化肥和有机肥能有效改善土壤肥力,增加土壤有机质和氮库^[14],不合理的施肥则会导致环境的立体污染^[15];在紫色土坡耕地,大多数农民采用顺坡耕作的制度,该制度下遇强降雨极易产生土壤侵蚀,而横坡耕作投入大、产量不高^[16-17]。因此,在追求经济效益和生态环境保护下,寻求合适的施肥模式和耕作方式极其必要,本文利用多年自然降雨条件下的径流小区长期定位施肥试验,研究了不同施肥模式和耕作方式下的土壤肥力质量变化特征,可为紫色土坡耕地地区建立科学合理的施肥和耕作制度提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于重庆市西南大学后山水土保持试验基地(29°48′42″N,106°24′20″E)。该基地为农业部南方山地丘陵面源污染地表径流监测试验点之一,属亚热带季风性气候,年均降雨量 1100 mm,年均温 18.3 ℃,最高气温 43 ℃,最低气温-1 ℃,年均日照时间为 1270 h,无霜期约 334 d,其中 5—9 月降雨量占全年

降雨量的 70%以上,土壤为中生代侏罗纪沙溪庙组紫色砂泥岩母质发育的紫色土,中等肥力水平。试验小区 2008 年种植季前测定的土壤化学性质见表 1。

1.2 试验设计

本试验选择一个土壤质地、肥力具有代表性,坡度为 15°的地块。共设置 15 个小区。每个小区规格为 32 m²(8 m×4 m),为防止各小区间发生水分和养分交换,小区之间用水泥墙的田埂隔开,埂宽 20~30 cm,墙体埋设在地下 30 cm,高出地面 20 cm。每个小区设置一个单独的径流池,径流池规格为 1.5 m×1.2 m×1.0 m,容积为 1.8 m³,在小区与径流池相连一段,沿小区宽度方向挖一个集流槽,每个集流槽设置一个“V”型出水口,每个小区径流入水口高度保持一致。

试验根据农业面源污染流失系数测算的需求共布设 5 个处理:顺坡耕作对照处理(CK)、顺坡耕作复合施用农家肥和化肥常规处理(T1)、顺坡耕作单施化肥优化处理(T2)、顺坡耕作单施化肥增量处理(T3)、横坡垄作单施化肥优化处理(T4)。其中垄高 5~8 cm,垄面宽 40~50 cm,垄距 40 cm,每个处理设置 3 次重复,试验小区种植模式为小麦-玉米轮作(品种为“渝麦 7 号”和“中糯 309”)。冬小麦采用穴播的方式,固定 30 cm×30 cm 的株行距于前一年 12 月前后播下,播种前施底肥,来年 2 月份对小麦追肥。夏玉米采用移栽的方式,固定 40 cm×150 cm 的株行距于当年 3 月份开始育苗,4 月中旬前后移栽到试验地块,播种前施用底肥,5 月下旬前后对玉米追肥。施用的氮、磷、钾肥分别为尿素(含 N≥46.4%)、过磷酸钙(含 P₂O₅≥12%)、氯化钾(含 K₂O≥60%)、农家肥(N≈0.24%,P₂O₅≈0.17%,K₂O≈0.21%),施肥方式为撒施。各处理具体施肥量见表 2。

1.3 土壤样品采集与径流量测试方法

2008—2016 年每年 10 月份(玉米收获季后)采用对角线混合法采集 1 次常规耕作层 0~20 cm 土样,每个小区采集 1 kg 左右,取其中 0.2 kg 左右鲜土用于测试硝态氮、铵态氮,其余的制成风干土样后测试有机质、全氮、全磷、有效磷、全钾指标。土样养分测试采用常规农化分析方法^[18]。本研究选取了长期定位连续监测土壤的有机质、全氮、铵态氮、硝态氮、全钾、全磷及速效磷 7 个指标作为参评指标反映土壤肥力的变

表 1 试验小区土壤化学性质
Table 1 Chemical properties of the test soils

土层/cm	有机质/g·kg ⁻¹	硝态氮/mg·kg ⁻¹	铵态氮/mg·kg ⁻¹	有效磷/mg·kg ⁻¹	全氮/g·kg ⁻¹	全磷/g·kg ⁻¹	有效钾/mg·kg ⁻¹	pH
0~20	8.75	19.51	24.19	18.29	0.76	0.68	71.39	8.16

表 2 不同小区施肥量

Table 2 Fertilizer application in different districts

试验处理	小麦肥料施用量/kg·hm ⁻²				玉米肥料施用量/kg·hm ⁻²			
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	农家肥	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	农家肥
CK	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
T1	138.00	45.00	0.00	72.00	221.00	144.00	0.00	216.00
T2	225.00	75.00	150.00	0.00	188.00	90.00	150.00	0.00
T3	337.50	112.50	225.00	0.00	282.00	135.00	225.00	0.00
T4	225.00	75.00	150.00	0.00	188.00	90.00	150.00	0.00

化。每次降雨后,先测定径流小区集水池里的径流总量,取完水样后,拧开每个径流池底排水凹槽处连通管的盖子,抽排径流水,排空后将径流池清洗干净,以备下一次采样和计量。

1.4 相关指标的计算

本文采用灰色关联法对该紫色土坡耕地土壤肥力质量进行评价。灰色关联分析的优点是方法简便、计算量小并且理论可靠,适用于多指标综合评价,以得出各评价单元按土壤肥力质量排序;灰色系统的关联分析是系统态势的量化比较分析^[9]。本实验选择有机质、全氮、全磷、有效磷、全钾、硝态氮、铵态氮等指标作为肥力因素,均为正向指标。评价指标的无量纲化,即将各指标的实际值转化为评价值,以消除各指标量纲带来的影响。

$$y_i = \frac{x_i}{x_0} \quad (1)$$

式中: y_i 为无量纲化值,即通过无量纲化使所有数据在 0~1 的区间之内; x_i 为评价对象实际值, $i=1,2,3,\dots$; x_0 为理想对象上限值。

关联度计算步骤如下:

理想对象数列为: $x_0=\{x_0(1),x_0(2),\dots,x_0(n)\}$,被评价对象数列为: $x_i=\{x_i(1),x_i(2),\dots,x_i(n)\}$, $i=1,2,3,\dots,m$ 。

关联系数:

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (2)$$

式中: $\xi_i(k)$ 为 x_0 与 x_i 在 k 点的关联系数。

关联度:

$$\gamma_i = \frac{\sum_{k=1}^n \xi_i(k)}{n} \quad (3)$$

式中: γ_i 为关联度。

以 k 个点(时刻)关联系数的平均值作为比较因素与分析因素整个关联程度的量度,即为关联度。以上公式中 $|x_0(k) - x_i(k)|$ 表示 x_0 数列与 x_i 数列在 k 点的绝对差; $\min_k |x_0(k) - x_i(k)|$ 为 x_0 与 x_i 在点 $k=1,2,3,\dots,n$ 上的最小绝对差,也称一级最小差; $\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)|$ 为因素 $i=1,2,3,\dots,m$ 在点 $k=1,2,3,\dots,n$ 上的最小绝对差,也称二级最小差; $\max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|$ 为二级最大差; ρ 为分辨系数,其取值在 0~1 之间,一般取 $\rho=0.5$ 。

1.5 数据处理

用灰色关联法计算关联度,差异性分析采用 SPSS 18.0,图表制作采用 Microsoft Excel 2010。

2 结果与分析

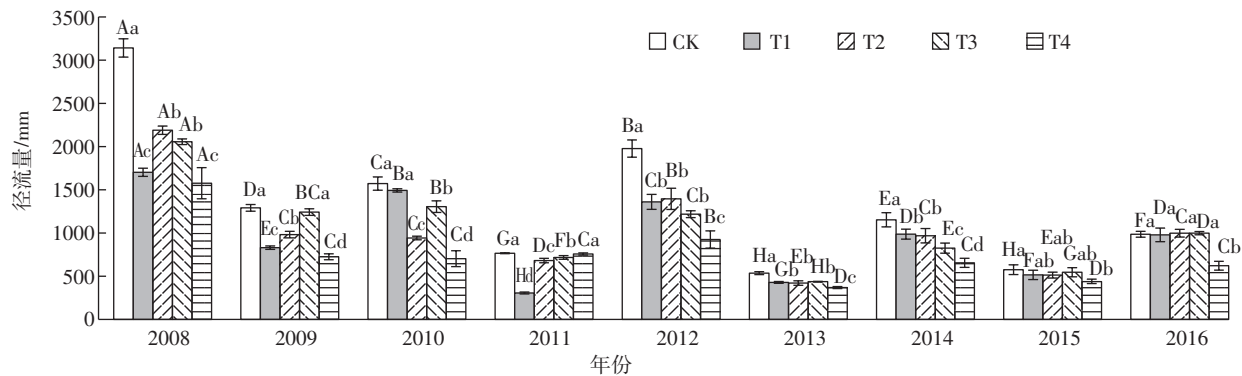
2.1 不同施肥模式和耕作方式下的地表径流特征

依据北碚气象站实测数据,2008—2016 年期间的年降雨量见表 3。小麦和玉米生长季灌溉均为自然降雨,未进行过人工灌溉。试验区年降雨量变化较大,多年平均降雨量为 1206 mm,2014、2015 年和 2016 年降雨量分别比多年平均降雨量高 46.93%、8.79% 和 51.41%。在试验设计的槽口处收集每次产生径流的径流量,得到各处理下的年平均径流量(图 1)。2014—2016 年降雨量最大但是径流量却小于其他年份,可能原因是该年度的有效降雨相对较少,只有降雨强度大于土壤的下渗强度才会开始产生径流,因此径流量

表 3 2008—2016 年历年降雨量(mm)

Table 3 Rainfall over the years(2008—2016)(mm)

年份	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年
降雨量	963	1199	1045	838	1104	795	1772	1312	1826



不同大写字母表示同一处理不同年份径流量在 $P<0.05$ 水平上差异显著;不同小写字母表示同一年不同处理径流量在 $P<0.05$ 水平上差异显著

图 1 2008—2016 年各处理下年平均径流量

Figure 1 Annual average runoff in 2008—2016

大小主要与降雨强度和地面因子相关,而年总降雨量的大小并不能起决定性作用。随着年度时间的变化,各处理下的径流量整体呈现逐渐减小趋势,不同处理下的年平均径流量之间差异显著,相同处理下不同年限间也存在显著差异($P<0.05$)。CK 是空白对照,其值反映自然耕作下的坡耕地径流量特征。各处理下的最大值均出现在 2008 年,分别为 3 141.4(CK)、1 702.63 (T1)、2 189.4(T2)、2 055.87 mm(T3)和 1 576 mm(T4),最小值大部分出现在 2013 年,分别为 535.5 (CK)、421.07(T2)、437.3 mm(T3)和 368.93 mm(T4),仅 T1 出现在 2011 年,为 306.23 mm。

在各小区年平均径流量中,均表现 CK 值最大, T4 值最小(2011 年除外),说明在相同施肥水平基础上,横坡耕作能有效地保水固土,而在无施肥顺坡耕作处理下,径流量最大的可能原因是不施肥导致土壤板结严重,植物得不到足够养分,根系固土效果最差,同时在顺坡的耕作方式下,水流更容易汇集成流,在遇到强暴雨时,雨滴对土壤的击溅侵蚀能力增强,水土流失加重,径流流失量最大。研究还发现,不同处理的年度变化与径流量可用对数函数模型($y=-a\ln x+b$)进行拟合,决定系数 R^2 在 0.281 3~0.675 4(表 4),表明径流量存在着年际差异,经过多年的种植与耕作,

土壤性质会趋于稳定,年径流量变化不大。

2.2 不同施肥模式和耕作方式下的土壤肥力质量评价

由表 5 可知,试验小区 2008、2009 年各处理下有机质含量相差不大,自 2010 年开始,不同处理下的有机质含量差异开始明显,2016 年与 2008 年有机质含量相比,CK、T1、T2、T3 和 T4 变化幅度分别为 -9.10%、+14.74%、-18.05%、-15.93%和 -6.53%;对比 2008 年土壤硝态氮含量,2016 年 CK、T1、T2、T3 和 T4 变化幅度分别为 -62.44%、-32.88%、-52.01%、-39.01%和 -40.79%;对比 2008 年土壤铵态氮含量,2016 年 CK、T1、T2、T3 和 T4 分别降低 74.44%、69.89%、73.75%、68.42%和 66.17%;对比 2008 年土壤全氮含量,2016 年 CK、T1、T2、T3 和 T4 分别降低 71.97%、13.24%、35.62%、37.30%和 30.50%;对比 2008 年土壤全磷含量,2016 年 CK、T1、T2、T3 和 T4 分别降低了 76.25%、20.91%、27.21%、24.36%和 51.65%;对比 2008 年土壤全钾含量,2016 年 CK、T1、T2、T3 和 T4 变化趋势分别为 -42.23%、-48.22%、-22.78%、-23.96%和 -34.37%;对比 2008 年土壤全磷含量,2016 年 CK、T1、T2、T3 和 T4 分别降低了 37.18%、44.55%、31.89%、26.10%和 28.30%。经过 9 个雨季,评价土壤肥力的各个指标均有不同程度地下降,说明紫色土区坡耕地在水土流失的同时伴随着土壤养分的流失。除由于多年自然降雨导致的土壤侵蚀外,其他可能原因主要为两个方面:一方面是因为施肥模式的影响,单施化肥与优化施肥、农家肥化肥配施相比,作物的生长相对较差,故根系固土效果较弱,本试验种植方式是小麦-玉米轮作,玉米和小麦根系能够增强土壤的抗蚀性已经在相关学者的研究中得到证实,这显著减少了径流流失和对坡地土壤的侵蚀,从而较大程度地维持了坡耕地的土

表 4 年度变化与径流量的关系方程

Table 4 Relation equation of annual change and runoff

处理	$y=-a\ln x+b$		R^2
	a	b	
CK	878.1	2 581.9	0.587 8
T1	361.4	1 469.9	0.281 3
T2	513.7	1 740.9	0.485 8
T3	561.7	1 837.4	0.675 4
T4	387.0	1 303.1	0.631 4

表 5 土壤肥力指标
Table 5 Soil fertility index

年份	处理	序号	硝态氮/mg·kg ⁻¹	铵态氮/mg·kg ⁻¹	有机质/g·kg ⁻¹	全氮/g·kg ⁻¹	全磷/g·kg ⁻¹	全钾/g·kg ⁻¹	速效磷/mg·kg ⁻¹
2008	CK	1	22.23±1.91	25.94±2.06	9.37±2.05	0.88±0.22	0.53±0.20	7.49±6.86	18.67±0.45
	T1	2	14.73±1.21	24.13±7.47	9.49±1.29	0.68±0.07	0.37±0.29	8.54±0.40	18.37±0.36
	T2	3	21.07±5.68	26.69±3.48	10.25±1.12	0.78±0.17	0.49±0.10	11.00±1.85	18.27±0.49
	T3	4	17.72±5.54	23.06±2.32	11.46±2.83	0.81±0.02	0.52±0.20	9.19±0.93	18.50±0.32
	T4	5	16.68±4.27	26.23±7.37	10.58±2.23	0.86±0.10	0.81±0.09	7.53±4.13	18.87±0.76
2009	CK	6	20.22±1.91	24.09±1.74	9.12±2.05	0.68±0.21	0.50±0.09	4.33±0.95	18.10±0.36
	T1	7	16.81±0.98	20.68±3.03	10.44±1.29	0.72±0.07	0.53±0.12	5.87±0.99	18.17±0.25
	T2	8	22.43±5.59	24.76±5.48	10.25±1.12	0.68±0.10	0.56±0.05	6.99±2.23	18.10±0.32
	T3	9	19.38±4.92	21.37±5.56	11.46±2.83	0.77±0.08	0.66±0.05	8.52±1.06	18.43±0.20
	T4	10	17.73±4.93	22.51±5.77	10.58±2.23	0.83±0.08	0.77±0.06	6.86±4.06	19.40±0.97
2010	CK	11	15.53±1.06	16.43±1.00	7.20±1.41	0.45±0.12	0.34±0.02	8.40±0.30	19.67±0.49
	T1	12	15.17±1.40	16.73±12.08	11.43±3.51	0.93±0.44	0.56±0.15	8.67±1.95	19.50±0.26
	T2	13	15.57±4.40	10.57±1.31	11.83±0.49	0.60±0.20	0.50±0.08	9.20±2.58	19.40±0.25
	T3	14	13.23±2.89	16.77±6.94	10.77±0.98	0.61±0.10	0.34±0.18	8.33±4.27	19.70±0.15
	T4	15	16.63±3.58	16.37±1.56	12.33±0.55	0.77±0.12	0.48±0.06	8.20±3.80	20.50±0.81
2011	CK	16	13.83±2.00	11.33±1.27	7.17±1.40	0.46±0.13	0.34±0.03	8.53±0.31	16.30±0.61
	T1	17	14.57±2.35	14.23±8.06	11.67±3.33	0.67±0.51	0.56±0.15	8.40±0.52	16.37±0.15
	T2	18	12.20±2.69	10.33±1.72	11.73±0.60	0.67±0.23	0.51±0.09	8.10±3.06	16.37±0.12
	T3	19	16.73±7.62	19.13±8.00	10.9±1.57	0.66±0.12	0.34±0.18	7.90±1.79	16.83±0.12
	T4	20	15.67±1.02	12.07±4.88	12.37±1.10	0.63±0.15	0.48±0.06	8.33±0.23	16.63±0.89
2012	CK	21	12.21±2.01	14.46±0.39	6.24±1.19	0.33±0.02	0.24±0.04	5.76±2.00	14.90±0.30
	T1	22	12.71±5.58	11.31±5.63	11.55±2.78	0.49±0.02	0.35±0.02	4.43±5.70	15.33±0.31
	T2	23	10.67±0.78	17.84±4.62	11.99±1.30	0.49±0.03	0.45±0.01	7.18±0.45	15.43±0.21
	T3	24	19.34±0.46	19.31±0.59	7.93±1.15	0.49±0.03	0.36±0.03	7.43±5.03	15.83±0.40
	T4	25	12.83±2.93	15.41±0.18	8.75±1.24	0.51±0.01	0.38±0.02	10.32±1.81	15.77±0.63
2013	CK	26	11.06±3.74	10.05±4.49	12.47±1.04	0.13±0.00	0.27±0.09	5.50±0.15	13.24±0.61
	T1	27	12.81±2.67	10.42±5.82	14.87±0.79	0.62±0.12	0.50±0.06	5.83±0.17	14.31±3.14
	T2	28	18.55±2.38	10.63±3.23	14.62±1.91	0.58±0.04	0.48±0.04	6.12±0.41	16.29±1.44
	T3	29	21.41±1.42	10.31±5.78	13.9±0.64	0.68±0.01	0.72±0.11	6.44±0.30	15.85±7.67
	T4	30	17.51±4.93	12.69±4.90	14.40±0.76	0.69±0.06	0.53±0.22	7.88±0.11	16.19±2.95
2014	CK	31	10.55±5.77	8.07±5.82	10.93±1.02	0.50±0.13	0.34±0.17	8.67±2.08	11.93±2.03
	T1	32	10.87±6.82	9.99±5.95	12.39±1.45	0.63±0.07	0.21±0.17	6.33±2.52	14.33±5.14
	T2	33	12.88±0.91	10.46±5.30	12.81±1.82	0.56±0.10	0.16±0.16	6.00±0.58	14.55±10.15
	T3	34	13.81±4.77	11.16±5.63	12.21±2.63	0.61±0.07	0.36±0.26	6.67±3.40	14.67±5.63
	T4	35	12.93±1.40	9.69±5.20	13.02±2.03	0.60±0.05	0.38±0.07	9.00±3.29	16.91±3.26
2015	CK	36	10.09±5.93	6.69±4.48	9.51±1.33	0.49±0.11	0.21±0.04	5.24±0.17	10.70±5.40
	T1	37	10.24±6.20	8.12±5.96	11.38±1.28	0.68±0.13	0.35±0.08	5.73±0.89	9.40±2.00
	T2	38	10.75±6.72	9.36±6.73	11.75±1.47	0.54±0.06	0.35±0.05	6.12±0.89	11.41±1.75
	T3	39	14.19±2.15	8.07±5.93	10.92±1.57	0.57±0.07	0.47±0.17	6.13±0.64	12.47±5.01
	T4	40	14.00±1.49	9.46±2.77	11.60±0.99	0.62±0.04	0.40±0.13	6.79±0.69	11.82±1.87
2016	CK	41	8.35±6.19	6.63±4.21	8.52±2.18	0.25±0.11	0.13±0.04	4.33±0.17	11.73±0.81
	T1	42	9.89±5.48	7.27±4.15	10.89±0.63	0.59±0.13	0.29±0.02	4.67±0.89	11.66±2.13
	T2	43	10.11±5.10	7.00±4.35	8.40±1.51	0.50±0.06	0.36±0.16	4.91±0.89	11.46±7.54
	T3	44	10.81±5.53	7.28±4.09	9.63±0.47	0.51±0.07	0.49±0.21	4.76±0.64	10.26±8.37
	T4	45	9.88±5.50	8.88±5.34	9.89±1.16	0.60±0.04	0.41±0.25	4.71±0.69	13.55±2.15

壤养分的含量;另一方面是因为耕作方式的影响,横坡耕作方式下天然形成了一道保水护土“屏障”,水稳性团聚体分布状况明显优于顺坡耕作方式下的试验小区,对土壤养分的固持作用更好,有效地改善土壤结构,使得该耕作方式下土壤养分含量较顺坡耕作方式更高。

通过对各指标进行灰色关联分析,得到在不同施肥模式、耕作方式下土壤肥力质量与理想情况下的关联度(图 2),“理想对象”的质量是系统中质量最优的,评价对象的关联度越大,说明与“理想对象”越接近,土壤肥力质量越高,反之亦然。经过多年种植后,参考 2016 年,对数据结果的关联度进行排序,结果表明横坡垄作单施化肥处理(T4)的关联度最高,为 0.521,与参考对象最为接近,表明在紫色土区,长期施肥下,横坡耕作方式下能更好地维持土壤肥力;其次为 T3(0.510)、T1(0.493)、T2(0.484);最低的是 CK(0.440),表明长期不施肥处理下土壤肥力与理想参考对象差距最大,在多年的径流小区试验下土壤肥力质量下降。

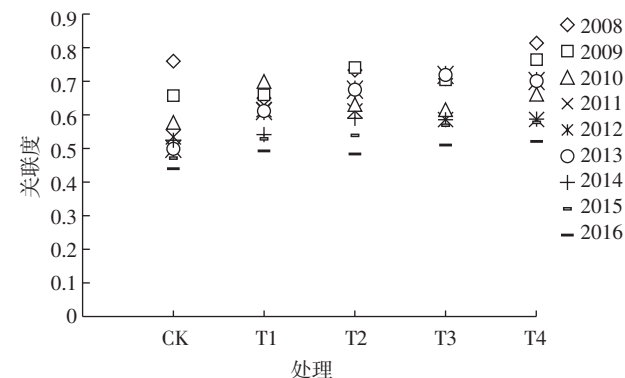


图 2 被评价对象与参考对象的关联度

Figure 2 The degree of relevance between the subject and the reference object

图 3 显示,连续施肥 9 年后,各处理下关联度均发生不同变化,整体呈现下降趋势。其中 CK 处理下,在 2014 年(0.525)小幅度上升后又继续下降;T1 处理下,年关联度先上升,在 2010 年达到最大值,然后下降;T2 处理下,在 2009 年(0.741)达到最大值之后,开始下降,然后又在 2011 年(0.612)之后开始上升,2013 年(0.675)之后又表现为下降趋势;T3 处理下,也同样是先下降后上升,拐点出现在 2013 年(0.719),之后开始下降变化;在 T4 处理下,在 2013 年(0.701)小幅度上升之后下降。CK、T1、T2、T3 和 T4 处理下关联度的最大值分别出现在 2008 年(0.760)、

2010 年(0.700)、2009 年(0.741)、2013 年(0.719)和 2008 年(0.814)。各处理下关联度的最大值主要集中在试验开展的前几年,土壤肥力表现最高;而且变化拐点大多数出现在 2013 年,根据表 3,研究区域在 2013 年降雨量(795 mm)略微偏少,而其他年份降雨情况比较正常,这直接减弱了坡耕地的水土流失,故关联度出现了小幅度增大。

与 2008 年相比,2016 年 CK 处理下关联度降低 42.11%,T1 减少 24.15%,T2 降低 34.01%,T3 减少 27.87%,T4 降低 35.95%。就目前 9 年实验研究结果,各处理下随着时间的变化,均呈现下降趋势,这是因为紫色土坡耕地区土层脆弱土质疏松,在长期的降雨侵蚀下容易发生养分流失。

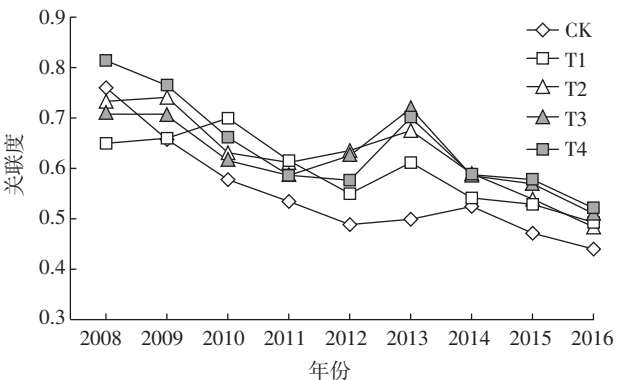


图 3 历年各模式平均关联度

Figure 3 Average correlation of each model

2.3 多年自然降雨和长期施肥下土壤肥力质量的综合分析

2008—2016 年各个处理下 9 年间的径流量均值结果见图 4。其中 CK(1 332.97)值最大,其次 T3(1 038.40)>T2(1 010.19)>T1(955.93),最小为 T4(752.57),与对照处理相比,实施施肥措施下径流量可以减少 22.10%~43.54%。说明在多年的自然降雨条件下,施肥模式和耕作方式都能对减少坡面地表径流量起到一定作用,其中横坡耕作方式对防治水土流失的效果最好。地表径流量是土壤养分径流输出十分重要的原因,在紫色土区,降雨冲刷地表,直接导致地表径流产生,当达到一定的降雨量和降雨强度,径流得以形成,之后逐渐发展造成泥沙流失,带走土壤中的养分,进而使得土壤贫瘠,耕作力下降。

2008—2016 年各个处理 9 年间的关联度均值结果见图 5。其中 T4 在 2008—2016 年 9 年关联度均值中最大,平均为 0.643,其次为 T2(0.627)>T3(0.625)>T1(0.594)>CK(0.550)。由此可见,耕作措施对土壤肥

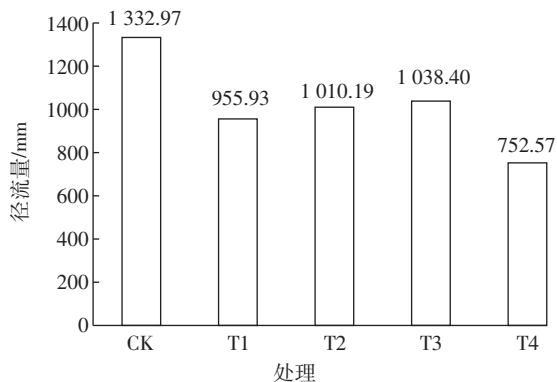


图 4 历年径流量均值

Figure 4 Mean value of runoff

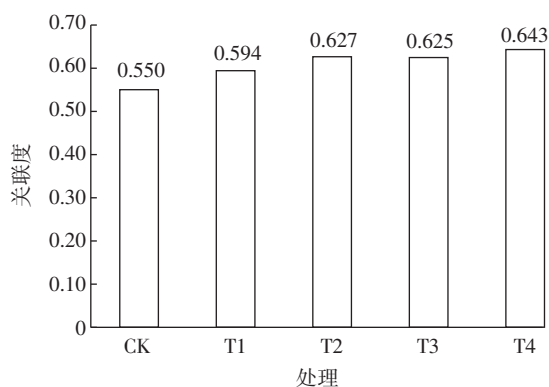


图 5 各处理下 2008—2016 年关联度均值

Figure 5 The mean value of each fertilization model in 2008—2016

力有显著的影响;该结果进一步说明,在长期施用化肥中,化肥的增施与长期不施肥相比可以有效地改善土壤肥力。

为了探讨径流量和关联度对土壤肥力的影响,本试验中,将不同处理年平均径流量与年平均关联度用函数模型进行拟合(表 6),满足 $y = -0.000\ 2x + 0.762\ 8$,决定系数 $R^2 = 0.748\ 4$,说明在年平均径流量最小的试验处理下,其土壤肥力关联度表现最佳,反之亦然,表明径流量是影响土壤肥力的重要因子,二者呈负相关。

3 讨论

水土流失造成的面源污染已经演变成亟需解决的生态环境问题。坡耕地土壤肥力下降的主要原因为水土流失侵蚀了耕作表层,使得土壤养分因此损失很大。实施合理的农田土壤管理措施不仅可以改善土壤理化性状,也可改变农田土壤生态过程^[20]。本试验研究表明,紫色土坡耕地地表径流量受多种因素的共同影响,包括水文因子、耕作方式和施肥模式,其中降雨

表 6 不同试验处理下多年平均径流量和关联度

Table 6 Average annual runoff and correlation in different fertilization modes

处理	多年平均径流量	多年平均关联度
CK	1 332.97	0.55
T1	955.93	0.59
T2	1 010.19	0.63
T3	1 038.40	0.62
T4	752.57	0.64

是引起地表径流并造成紫色土坡耕地地区水土流失的主要原因,降雨作为紫色土区坡耕地土壤侵蚀的源动力,产生地表径流、壤中流和地下径流等坡地径流形式,带走了土壤的大部分养分^[21]。而土壤养分损失是复杂且综合的过程,本文结合多年的地表径流和土壤肥力指标综合分析坡耕地土壤肥力水平,研究结果表明,横坡耕作方式下流失径流量最小,评价土壤肥力水平的关联度值最大。学者常用关联度分析来评价土壤肥力^[22-23],本文采用此方法综合评价不同施肥模式和耕作方式下紫色土区坡耕地的土壤肥力。这与傅涛等^[24]、朱波等^[25]、赵赛东^[26]研究结果符合,同时,与张怡等^[17]研究发现横坡耕作较顺坡耕作对紫色土区的有机碳有更好的固持作用的结论类似。鲁耀等^[27]在红壤坡耕地连续三年自然降雨下研究得出,在常规施肥处理下径流量和氮磷流失量之间呈极其显著的指数相关性,而本文研究得出不同处理的年平均径流量与年平均关联度二者呈一次函数关系,这是因为本文关注的是土壤肥力的本底值,而未考虑径流中的氮磷流失量。本研究还发现,在多年施肥与降雨环境下,其中硝态氮和铵态氮减少最为明显,可能原因是氮肥过量施入农田,超出了作物的吸收能力和土壤的固持能力,造成土壤剖面中硝态氮不断流失^[28]。而且小区采用了顺坡和横坡两种耕作方式,顺坡制度下在南方紫色土区坡耕地更容易发生淋洗流失^[29]。

土壤中的养分流失一般有 2 个主要途径:一是随地表径流水相和沉积物相的横向迁移;二是随水分下渗形成的纵向迁移,即养分的淋失。土壤径流中磷和钾流失的主要途径是地表径流,而氮素流失的主要途径是壤中流^[30],而径流和泥沙流失是坡面铵态氮流失的两种途径^[31-32]。但在氮、磷随壤中流水平侧向迁移传输研究方面,受研究手段和试验条件等限制,对氮磷等养分迁移传输及其污染控制等机理研究多集中在降雨—地表径流传输上,忽略了壤中流对土壤养分流失的影响,土壤中氮磷含量不断累积,在壤中流和地

下径流发育地区,土壤养分渗漏流失也不容忽视;同时土壤养分的损失还包括土壤内部复杂的转化过程、植物吸收利用、淋失、气态化损失和人为活动引起的损失。可见,紫色土区坡耕地土壤肥力的情况和变化趋势还需深入开展研究,应综合多方面影响因素进行评价。

4 结论

(1)多年平均径流量大小关系表现为 CK(1 332.97)>T3(1 038.40)>T2(1 010.19)>T1(955.93)>T4(752.57);多年平均径流量与多年平均关联度满足线性函数模型 $y = -0.0002x + 0.7628$ ($R^2 = 0.7484$),随着径流量的增大,土壤肥力质量显著下降,二者呈负相关关系。

(2)5种不同试验处理下,评价土壤肥力的关联度逐年减小,在多年监测试验下,相比顺坡耕作处理,其中横坡耕作单施化肥处理能有效地维持土壤肥力水平;而顺坡耕作处理下,化肥和农家肥配施处理则能够相对提高土壤综合肥力。

(3)从年际变化来看,表征土壤肥力的各项指标总体呈下降趋势,其中土壤铵态氮和硝态氮的流失幅度最大,故针对紫色土区坡耕地应严格控制氮肥的施用量。

参考文献:

- [1] 倪九派,魏朝富,高明,等.三峡库区坡耕地土壤养分流失的实验研究[J].水土保持学报,2008,22(5):38-42.
NI Jiu-Pai, WEI Chao-Fu, GAO Ming, et al. Research on nutrient loss from slope land in Three Gorges Reservoir area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(5):38-42.
- [2] 龙天渝,曹怀亮,安强,等.三峡库区紫色土坡耕地吸附态磷可迁移污染负荷空间分布[J].农业工程学报,2013,29(4):157-164,297.
LONG Tian-yu, CAO Huai-liang, AN Qiang, et al. Spatial distribution of transfer pollution absorbed phosphorus load in slope farmland of purple soil in Three Gorges Reservoir region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(4):157-164, 297.
- [3] 刘光德,赵中金,李其林.三峡库区农业面源污染现状及其防治对策[J].中国生态农业学报,2004,12(2):177-180.
LIU Guang-de, ZHAO Zhong-jin, LI Qi-lin. Study on the status of agricultural non point source(NPS) pollution in the Three Gorges area and its control countermeasures[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2004, 12(2):177-180.
- [4] 黄丽,项雅玲,袁锦方.三峡库区农田的化肥面源污染状况研究[J].农业环境科学学报,2007,26(S2):362-367.
HUANG Li, XIANG Ya-ling, YUAN Jin-fang. Non-point pollution from farmland of the Three Gorges Reservoir region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(S2):362-367.

- [5] 冯小杰,郑子成,李廷轩.紫色土区坡耕地玉米季地表径流及其氮素流失特征[J].水土保持学报,2017,31(1):43-48.
FENG Xiao-jie, ZHENG Zi-cheng, LI Ting-xuan. Characteristics of runoff and nitrogen loss in sloping cropland of purple soil during corn growing season[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(1):43-48.
- [6] 张洋,樊芳玲,周川,等.三峡库区农桑配置对地表氮磷流失的影响[J].土壤学报,2016,53(1):189-201.
ZHANG Yang, FAN Fang-ling, ZHOU Chuan, et al. Effects of crop/maize intercropping on surface nitrogen and phosphorus losses in Three Gorges Reservoir area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(1):189-201.
- [7] 王心星,荣湘民,张玉平,等.自然降雨条件下玉米与不同作物间套作的氮损失特征[J].水土保持学报,2014,28(5):113-118.
WANG Xin-xing, RONG Xiang-min, ZHANG Yu-ping, et al. Nitrogen loss in the different maize intercropping on surface runoff under the natural rainfall conditions[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(5):113-118.
- [8] 焉莉,高强,张志丹,等.自然降雨条件下减肥和资源再利用对东北黑土玉米地氮磷流失的影响[J].水土保持学报,2014,28(4):1-6,103.
YAN Li, GAO Qiang, ZHANG Zhi-dan, et al. Effect of reducing fertilizer and resource recycling on nitrogen and phosphorus loss on black soil with planting maize in northeast region under natural rainfall condition[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(4):1-6, 103.
- [9] 聂军,廖育林,谢坚,等.自然降雨条件下香根草生物篱对菜地土壤地表径流和氮流失的影响[J].水土保持学报,2009,23(1):12-16,67.
NIE Jun, LIAO Yu-lin, XIE Jian, et al. Impacts of biological hedgerow of vetiver on surface runoff and nitrogen loss in vegetable field under natural rainfall[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(1):12-16, 67.
- [10] 焦平金,许迪,王少丽,等.自然降雨条件下农田地表产流及氮磷流失规律研究[J].农业环境科学学报,2010,29(3):534-540.
JIAO Ping-jin, XU Di, WANG Shao-li, et al. Nitrogen and phosphorus runoff losses from farmland under nature rainfall[J]. *Journal of Agro-Environment Sciences*, 2010, 29(3):534-540.
- [11] 郑海金,王辉文,杨洁,等.地表径流和壤中流对坡耕地氮磷流失影响研究概述[J].中国水土保持,2015(2):36-39.
ZHENG Hai-jin, WANG Hui-wen, YANG Jie, et al. Summary of study on influence of surface runoff and subsurface flow to loss of nitrogen and phosphorus of slope farmland[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2015(2):36-39.
- [12] 马芳红,张光辉,耿韧,等.我国水蚀区坡耕地土壤肥力现状分析[J].水土保持学报,2016,30(5):190-196.
MA Qian-hong, ZHANG Guang-hui, GENG Ren, et al. Present condition analysis of sloping farmland soil fertility in the water erosion zone of China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(5):190-196.
- [13] Verma J P, Jaiswal D K, Meena V S, et al. Issues and challenges about sustainable agriculture production for management of natural resources to sustain soil fertility and health[J]. *Journal of Cleaner Production*,

- 2015, 107:793-794.
- [14] 温廷臣, 李燕青, 袁亮, 等. 长期不同施肥制度土壤肥力特征综合评价方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7):91-99.
WEN Yan-chen, LI YAN-qing, YUAN Liang, et al. Comprehensive assessment methodology of characteristics of soil fertility under different fertilization regimes in North China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(7):91-99.
- [15] 贾树龙, 孟春香, 杨云马, 等. 华北平原区农田优化施肥技术防治立体污染效果研究[J]. 中国土壤与肥料, 2010(2):1-6.
JIA Shu-long, MENG Chun-xiang, YANG Yun-ma, et al. Effect of optimized fertilization on agricultural tridimension pollution control in northern China plain[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2010(2):1-6.
- [16] 田太强, 何丙辉, 闫建梅, 等. 长期定位施肥对紫色丘陵区作物产量稳定性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(5):100-103.
TIAN Tai-qiang, HE Bing-hui, YAN Jian-mei, et al. Effect of long-term fertilization on crop yield stability in purple hilly region[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2013, 32(5):100-103.
- [17] 张怡, 何丙辉, 王仁新, 等. 横坡和顺坡耕作对紫色土土壤团聚体稳定性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(2):192-198.
ZHANG Yi, HE Bing-hui, WANG Ren-xin, et al. Effect of across- and along-slope on soil aggregate stability[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(2):192-198.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 三版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO Shi-dan. Soil agro-chemical analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [19] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 1987.
DENG Ju-long. The essential methods of grey system[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1987.
- [20] 刘泉, 李占斌, 李鹏, 等. 模拟降雨条件下不同植被覆盖度/格局的坡地土壤铵态氮流失特征[J]. 水土保持研究, 2017, 24(1):75-78.
LIU Quan, LI Zhan-bin, LI Peng, et al. Characteristics of ammonium nitrogen($\text{NH}_4\text{-N}$) loss from slope lands with different vegetation cover/patterns under simulated rainfall[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(1):75-78.
- [21] 谢颂华, 莫明浩, 涂安国, 等. 自然降雨条件下红壤坡面径流垂向分层输出特征[J]. 农业工程学报, 2014, 30(19):132-138.
XIE Song-hua, MO Ming-hao, TU An-guo, et al. Characteristics of vertical runoff output on red-soil slope under natural rainfall condition[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(19):132-138.
- [22] 张雪凌, 姜慧敏, 刘晓, 等. 优化氮肥用量和基追比例提高红壤性水稻土肥力和双季稻氮素的农学效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(2):351-359.
ZHANG Xue-ling, JIANG Hui-min, LIU Xiao, et al. Optimization of nitrogen rate and base and topdressing ratio to improve agronomic soil fertility and use efficiency of nitrogen in rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(2):351-359.
- [23] 郑敏娜, 梁秀芝, 李荫藩, 等. 紫花苜蓿人工草地土壤肥力的灰色关联度分析[J]. 中国草地学报, 2017, 39(2):111-116.
ZHENG Min-na, LIANG Xiu-zhi, LI Yin-fan, et al. Grey correlation analysis of soil fertility of alfalfa artificial grassland[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2017, 39(2):111-116.
- [24] 傅涛, 倪九派, 魏朝富, 等. 坡耕地土壤侵蚀研究进展[J]. 水土保持学报, 2001, 15(3):123-128.
FU Tao, NI Jiu-pai, WEI Chao-fu, et al. Recent development of sloping field erosion[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(3):123-128.
- [25] 朱波, 陈实, 游祥, 等. 紫色土退化旱地的肥力恢复与重建[J]. 土壤学报, 2002, 39(5):743-749.
ZHU Bo, CHEN Shi, YOU Xiang, et al. Soil fertility restoration on degraded upland of purple soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(5):743-749.
- [26] 赵赛东. 不同水土保持措施对黑土坡耕地土壤侵蚀及肥力的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015.
ZHAO Sai-dong. The effect of soil and water conservation measures on soil erosion and fertility under black soil sloping farmland[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015.
- [27] 鲁耀, 胡万里, 雷宝坤, 等. 云南坡耕地红壤地表径流氮磷流失特征定位监测[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(8):1544-1553.
LU Yao, HU Wan-li, LEI Bao-kun, et al. The monitoring of nitrogen and phosphorus loss by surface runoff in sloping red soil fields of Yunnan Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(8):1544-1553.
- [28] 张怡, 何丙辉, 唐春霞. “大横坡+小顺坡”耕作模式对氮及径流流失的影响[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2013, 38(3):107-112.
ZHANG Yi, HE Bing-hui, TANG Chun-xia, et al. Influence of different straight tillage & contour tillage measures on nitrogen loss from runoff and runoff loss[J]. *Journal of Southwest China Normal University*, 2013, 38(3):107-112.
- [29] 李玉洁, 王慧, 赵建宁, 等. 耕作方式对农田土壤理化因子和生物学特性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(3):939-948.
LI Yu-jie, WANG Hui, ZHAO Jian-ning, et al. Effects of tillage methods on soil physicochemical properties and biological characteristics in farmland[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(3):939-948.
- [30] 罗付香, 林超文, 涂仕华, 等. 氮肥形态对坡耕地雨季土壤养分流失的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2013, 30(6):91-95.
LUO Fu-xiang, LIN Chao-wen, TU Shi-hua, et al. Effect of nitrogenous fertilizer modality on soil nutrient loss of sloping land in rainy season[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2013, 30(6):91-95.
- [31] 何铁光, 秦芳, 苏天明, 等. 不同栽培模式对氮磷钾养分径流流失的影响[J]. 水土保持研究, 2014, 21(1):95-99.
HE Tie-guang, QIN Fang, SU Tian-ming, et al. Effect of different cultivation methods on nitrogen and phosphorus losses along with runoff[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(1):95-99.
- [32] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China—contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 63(2/3):117-127.