

黄土高原沟壑区利用苜蓿复耕对土壤腐殖质特性的影响

马生发, 陈红, 曹宏

(陇东学院农林科技学院, 甘肃 庆阳 745000)

摘要: 对于工业废弃地采用苜蓿进行复耕, 测定不同种植方式的有机质含量、腐殖质组成形态及胡敏酸的光学特性, 比较分析认为: 复耕利用苜蓿是恢复地力的有效途径, 但苜蓿种植年限以 10~15 年内改种大田作物较佳。试验研究表明: 随苜蓿种植年限延长黄绵土的有机质含量逐步提高, 并促进了土壤的熟化; 苜蓿地的腐殖质结合形态均为松结态>稳结态; 苜蓿种植 5~15 年的 3 个阶段有机碳、腐殖质总量及各组分含量逐渐呈递增趋势, 种植苜蓿的土壤 HA/FA 比值大于 1; 苜蓿种植年限在 5~15 年间, 土壤胡敏酸向着分子量增大、芳化度提高、结构复杂的方向演化, 而种植 20 年后, 胡敏酸品质则向相反方向演化, 并与撂荒地相似。

关键词: 复耕; 苜蓿; 利用方式; 土壤性质

中图分类号: S153.622

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2011)01-0229-05

Study on the Utilization Methods of the Complex Cultivated Land Alfalfa in Gully Region of the Loess Plateau

MA Sheng-fa, CHEN Hong, CAO Hong

(College of Agriculture and Forestry Sciences, Longdong University, Qingyang, Gansu 745000)

Abstract: Reply cultivated land organic content, humus of alfalfa make up shape and moustache quick sour optical characteristic by determining with planting, comparative analysis explores and resumes land fertility to reply the route to plough. The results show that loessal soil organic matter content gradually increased, and may contribute to aging of soil with the alfalfa plant life extension; Humus of alfalfa combine shape loose to form attitude greater than marrying the attitude; Alfalfa cultivation 5 to 15 years, three phases organic carbon, total amount and the composition of humus content gradually increases gradually, planting alfalfa soil HA/FA ratio greater than 1; Alfalfa plant life in 5 to 15 years, toward the molecular weight of humic acid increased degree of increased aromatic, the direction of evolution of complex structures, but planted 20 years later, the quality of humic acid is in the opposite direction of evolution, and similar with the abandoned land. That the implementation of comprehensive rehabilitation is better than grass and crop rotation by way of abandonment, rehabilitation use of alfalfa is an effective way to restore soil fertility, but the alfalfa plant life of 10 to 15 years with better rehabilitation.

Key words: rehabilitation; alfalfa; use patterns; soil properties

工业、建筑业等撂荒地逐渐增多, 致使农田面积不断被减少, 所以对于撂荒地复耕迫在眉睫。大部分撂荒地质量下降, 粮食产量下降。由于工业建设等用地剥离表土, 导致土壤耕层丧失, 致使好地变差地, 熟土变生土, 难以恢复肥力, 复耕难度较大。为此, 改善土壤肥力因素、调节土壤肥力结构, 是复耕的关键。土壤有机质是土壤的重要组成部分, 它的主体为腐殖质, 土壤腐殖质与无机矿物结合而形成的有机无机复合体是构成土壤肥力的物质基础, 决定着土壤的抗逆性能与缓冲性能, 是土壤发挥肥力作用的物质基础和最小功能单位, 也是土壤肥力的核心物质。但是, 过去对土壤的研究主要集中在肥力方面^[1], 对土壤腐殖质缺乏系统的研究。甘肃省陇东黄土高原沟壑区, 是全国典型水土流失区之一, 该区农业发展的主要限制因素是干旱, 春季多风, 土壤瘠薄, 水土流失严重^[2]。研究黄土高原沟壑区土壤复耕的先锋作物对土壤有机碳及腐殖质特性的影响, 对于促进该区耕层剥离土壤腐殖质的形成和更新以及熟化度, 恢复地力等均有着重要的理论和现实意义, 也为保证基本农田建设, 实现区域生态重建和农业可持续发展的提供依据。

收稿日期: 2010-07-17

基金项目: 甘肃省科技成果转化项目“优质苜蓿品种示范及加工利用”(编号: 0805XCNM069)

作者简介: 马生发(1966—), 男, 甘肃宁县人, 硕士, 副教授, 主要从事作物及牧草生产应用研究工作。E-mail: mashengfa261@126.com

1 试验地基本概况

样点位于黄土沟壑区腹地的庆阳市西峰区地庄村,是停产砖瓦厂恢复生产试点,土壤为黄绵土,该区属全国典型水土流失区之一,侵蚀面积 2.505 万 km²,占全区总面积 92.4%,侵蚀模数 6 383~9 000 t/hm²。属暖温带半干旱季风气候区,由于季风的强烈影响,冬季寒冷干燥,春季多风且干旱少雨,夏季温暖多雨,水热同期,年降水量 400~600 mm,雨量分布不均,主要集中在 7—9 月,多年平均蒸发量 1 000 mm 以上。

2 研究和分析方法

(1)试验地设置及土样采集:复耕方式设直接复耕、种植苜蓿恢复土壤肥力后复耕、撂荒自然恢复地力 3 种,分别测定土样,土样为种植苜蓿 5,10,15,20 年;当年复耕地、复耕种植农作物 5 年和 10 年地;撂荒地(CK)。处理见表 1。于 1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2008 年 4 月中旬进行取样,在每块调查样地上,采用网格随机取样方法,以 5 m 的网格间隔选择 15 个点,分别采集 0—20,20—40,40—60 cm 土样,混合后装入塑料袋编号,带回室内,将采集样品去植物根系、石块等,然后在常温下晾干、研磨、过 1 mm 筛,袋装密闭备用。

(2)分析项目与测定方法:土壤有机质测定用油浴重铬酸钾容量法^[3],腐殖质结合形态采用熊毅—傅积平改进法^[4,5],腐殖质组分测定用科诺诺娃法^[6]。

表 1 土壤样点设置

样品号	复耕方式	土地利用方式	利用状况	管理水平
F	F0	当年种植大田作物地	农家肥和氮、磷化 肥配施,常规耕作	与一般大田相同
	F5	种植大田作物 5 年地		
	F10	种植大田作物 10 年地		
M	M5	苜蓿 5 年后改种作物	人工草地—农田 种植紫花苜蓿	人工种植紫花苜蓿,生长期不 施农家肥和氮、磷化肥,不中 耕除草和病虫害防治
	M10	苜蓿 10 年后改种作物		
	M15	苜蓿 15 年后改种作物		
	M20	种植苜蓿 20 年		
L	CK	撂荒地(10 年)	农田弃耕	无管理措施,植被杂草残叶还田

3 结果与分析

3.1 利用苜蓿复耕方式对土壤有机质的影响

在土壤熟化过程中,有机质含量是衡量土壤肥力水平及土壤持续利用的重要指标^[7]。不同复耕种植方式比较(表 2)显示:种植苜蓿 10 年的表层剥离黄绵土有机质高于撂荒地,明显高于当年复耕作物;复耕种植苜蓿地有机质演化随种植年限表现出增加特征,但年限超过 10 年

表 2 土壤有机质含量的变化

土样号	有机质/ (g·kg ⁻¹)	土样号	有机质/ (g·kg ⁻¹)	土样号	有机质/ (g·kg ⁻¹)
F5(0—20 cm)	8.74	F10(0—20 cm)	6.22	L10(0—20 cm)	10.56
F5(20—40 cm)	6.61	F10(20—40 cm)	5.72	L10(20—40 cm)	6.91
F5(40—60 cm)	6.95	F10(40—60 cm)	5.57	L10(40—60 cm)	6.18
M5(0—20 cm)	9.27	M10(0—20 cm)	11.42	M15(0—20 cm)	11.44
M5(20—40 cm)	7.84	M10(20—40 cm)	6.88	M15(20—40 cm)	7.30
M5(40—60 cm)	6.11	M10(40—60 cm)	6.18	M15(40—60 cm)	4.80

后增加甚微;利用苜蓿复耕方式有机质表层增加较明显,底层最缓慢,同时土壤下层有机质随年限而较少,层次越深,减少越多,10 年较对照显著减少;当年复耕地明显低于撂荒地和草地,并随复耕年限而加速递减。

苜蓿地开垦为农田后,因人为扰动,土壤通气性得到改善,有机质的芳化加强,使各层有机质有明显的下降趋势;表层有机质有所下降,原因是人为耕作散失和部分有机质流出农田系统外。将农田弃置为荒地 10 年后,由于表层枯枝残叶的积累,有机质含量较高,与种植多年苜蓿土壤有机质相近,差异不显著。

3.2 复耕苜蓿种植年限对土壤腐殖质组分的影响

土壤腐殖质的组成和性质反映了土壤形成条件及形成过程的特点。不同类型土壤的腐殖质组成及性质各不相同^[8,9]。在黄绵土上种植苜蓿的土壤在熟化过程中,随着种植年限的不同及开垦条件变化,有机碳和腐殖质组分(胡敏酸 HA、富啡酸 FA、胡敏素 HM)也呈现出阶段性变化(表 3)。苜蓿种植 5 年、10 年、15 年的 3 个阶段有机碳、腐殖质总量及各组分含量逐渐呈递增趋势,20 年时则呈降低趋势。其中苜蓿种植 5~10 年段,0—20 cm 有机碳总量增加明显 2.48 g/kg,随土层加深也有所增加,但较表层增加量少;腐殖质总量增加规律和有机碳总量增加相似,但增加相比不明显。10~15 年段有机碳、腐殖质总量及各组分含量递增效果减缓。

种植苜蓿 15 年后开垦为农田,胡敏酸则呈明显的降低趋势,其原因是受农田人为施肥的影响。撂荒地有

机碳和胡敏酸含量明显低于种植 10 年以上的苜蓿地。从不同土层分析,腐殖质各组分含量由表层至下层基本呈降低趋势,而但撂荒地胡敏酸含量无规律性。各阶段腐殖质总量及各组分含量与有机质含量相吻合,腐殖质总量与 HA、FA 呈极显著或显著相关,其相关系数分别为 0.708^{**} ($n=18, r_{0.01}=0.561, y=0.3482+0.2001x$) 和 0.448^{*} ($n=18, r_{0.05}=0.444, y=0.3051+0.2346x$)。

表 3 种植年限、撂荒和当年复耕对土壤腐殖质组成的影响

土样 编号	土层/ cm	有机碳/ (g·kg ⁻¹)	腐殖质组分/(g·kg ⁻¹)			占有机碳百分数/%			HA/FA
			HA	FA	HM	HA	FA	HM	
M20	0—20	5.07	1.36	1.35	2.36	26.8	26.6	46.6	1.01
M20	20—40	3.83	1.08	0.82	1.93	28.2	21.4	50.4	1.32
M20	40—60	4.03	1.21	1.15	1.67	30.0	28.5	41.4	1.05
M15	0—20	6.62	1.58	1.17	3.87	23.9	17.7	58.4	1.35
M15	20—40	3.99	1.17	1.06	1.76	29.3	26.6	44.1	1.10
M15	40—60	3.58	1.08	0.98	1.52	30.2	27.8	42.4	1.10
M10	0—20	6.13	2.14	1.06	2.93	34.9	17.3	47.8	2.02
M10	20—40	4.01	1.41	0.99	1.61	35.2	24.7	40.1	1.42
M10	40—60	3.58	1.03	0.95	1.60	28.8	26.5	44.7	1.08
M5	0—20	3.61	1.23	1.14	1.24	34.1	31.6	34.3	1.14
M5	20—40	3.32	1.21	0.88	1.23	36.5	26.5	37.0	1.72
M5	40—60	3.23	1.10	0.81	1.32	34.0	25.1	40.9	1.34
F5	0—20	5.38	1.21	2.73	1.44	22.5	50.7	26.8	0.44
F5	20—40	4.55	1.02	1.77	1.76	22.4	38.9	38.7	0.58
F5	40—60	3.54	0.87	1.64	1.03	24.6	46.3	29.1	0.53
L10	0—20	5.48	1.10	2.18	2.20	20.1	39.8	40.1	0.29
L10	20—40	4.23	1.18	2.08	0.97	27.9	38.9	38.7	0.57
L10	40—60	2.79	0.75	0.76	1.28	26.9	46.3	29.1	0.99

进一步研究表明:种植苜蓿的土壤 HA/FA 比值大于 1,开垦地、撂荒地比值则显著小于 1。5~10 年苜蓿地 HA/FA 呈增高趋势,以 10 年最高,然后呈降低趋势。说明在黄绵土上种植苜蓿可提高胡敏酸含量和 HA/FA 比值。HA/FA 比值由表层至下层基本呈下降趋势,随苜蓿种植年限各层均有增高的趋势,HA/FA 比值越高,说明胡敏酸含量越高,分子量增大,分子结构越复杂,反之亦然^[10]。在肥力水平低下的黄绵土上种植苜蓿豆科植物,有机质积累明显提高,导致土壤腐殖质含量增加,腐殖化程度和矿化度提高,显示出土壤由低肥力向高肥力的方向演变,但苜蓿最长种植年限不应高于 15 年。

表 4 土壤腐殖质的结合形态

土样 编号	层次/ cm	有机碳/ (g·kg ⁻¹)	松结态/ (g·kg ⁻¹)	稳结态/ (g·kg ⁻¹)	紧结态/ (g·kg ⁻¹)	松结态/ 稳结态	松结态/ 紧结态	松+稳/ (g·kg ⁻¹)	总量/ (g·kg ⁻¹)
M20	0—20	5.07	0.72	0.61	3.74	1.18	0.19	1.33	5.07
M20	20—40	3.83	0.72	0.49	2.62	1.47	0.27	1.21	3.83
M20	40—60	4.03	0.52	0.28	3.23	1.86	0.16	0.80	4.03
M15	0—20	6.62	0.87	0.79	4.96	1.10	0.18	1.66	6.62
M15	20—40	3.99	0.88	0.68	2.43	1.29	0.36	1.56	3.99
M15	40—60	3.58	1.12	0.60	1.86	1.87	0.60	1.72	3.58
M10	0—20	6.13	0.76	0.68	4.69	1.12	0.16	1.44	6.13
M10	20—40	4.01	0.68	0.47	2.86	1.45	0.24	1.09	4.01
M10	40—60	3.58	0.44	0.28	2.86	1.57	0.15	0.72	3.58
M5	0—20	3.61	0.52	0.37	2.72	1.40	0.19	0.89	3.61
M5	20—40	3.32	0.48	0.46	2.38	1.03	0.20	0.94	3.32
M5	40—60	3.23	0.40	0.32	2.51	1.25	0.16	0.72	3.23
F5	0—20	5.38	0.76	0.73	3.89	1.04	0.19	1.49	5.38
F5	20—40	4.55	0.40	0.58	3.57	0.69	0.11	0.98	4.55
F5	40—60	3.54	0.44	0.52	2.58	0.85	0.17	0.96	3.54
L10	0—20	5.48	0.76	0.71	4.01	1.07	0.19	1.47	5.48
L10	20—40	4.23	0.34	0.43	3.46	0.79	0.10	0.77	4.23
L10	40—60	2.79	0.36	0.39	2.04	0.92	0.18	0.75	2.79

3.3 土壤腐殖质结合形态的变化

许多研究认为,土壤肥力的高低在很大程度上取决于腐殖质的“质的组成”^[11,12],松结合态碳对土壤有效养分的供应起着重要作用,而紧结合态碳在全量养分的保贮及稳定结构方面起着重要作用。土壤的肥力水平更主要受松结态腐殖质比例的影响^[13]。表 4 表明:黄绵土腐殖质以紧结态为主;种植苜蓿无论年限长短如何,各层含量均以松结态>稳结态,15 年苜蓿地松结态、稳结态腐殖质含量最高,15 年以后有降低趋势;撂荒地和复耕地表层为松结态高于稳结态,20—60 cm 则以稳结态高于松结态;在土壤剖面上由上至下各结合形态呈降低趋势,松/紧比值高,则土壤的腐殖化度高,对形成良好土壤结构的能力增强,土壤肥力提高,反之亦然^[14]。松/紧比以撂荒地和复耕地最低,且表层>下层>中层;苜蓿地随种植年限延长有增高的趋势,15 年苜蓿地土壤松/紧最大,由表层至下层显著升高,规律性最强;10~20 年表层至下层松/紧有升高的规律,种植 5,10,20 年苜蓿土壤松/稳比值中层>表层>下层,也有较强的规律性,而且高于复耕地,明显高于撂荒地。说明种植苜蓿主要对 20—40 cm 土层肥力影响较大。而撂荒地和开垦地为最低,表明将苜蓿地开垦后土壤肥力退化,将耕地撂荒虽然表层土壤有机质含量有所提高,但松/稳比值与种植苜蓿比较有下降趋势,土壤肥力并未提高。

3.4 胡敏酸的光学性质变化

胡敏酸的光学性质是判断土壤腐殖质特性的重要依据, E_{465} 值越大,分子的复杂程度越高,芳香族原子团多,缩合程度较高,相反则芳香性小,脂肪侧链多,光密度较小^[5]。从表 5 可见,不同种植年限苜蓿总体 E_{465} 值高于撂荒地,而复耕地的 E_{465} 值最高,但由表层至下层无规律性变化。 E_{465}/E_{665} 值在一定程度上可表示芳香物质的缩合程度的高低,随分子量和缩合度的增加而下降,常用作腐殖化及土壤肥力的指标^[7]。

表 5 进一步显示,种植苜蓿 5,10,15 年 E_4 值大,而 E_4/E_6 比值变小,20 年苜蓿和撂荒地则 E_{465} 值小, E_{465}/E_{665} 比值显著增大,说明当苜蓿种植年限在 5~15 年间,土壤胡敏酸向着分子量增大、芳化度提高、结构复杂的方向演化,种植苜蓿达 20 年后,胡敏酸品质则向相反方向演化,并与撂荒地相似。撂荒地 E_{465} 值小,但 E_{465}/E_{665} 比值反而增大,说明撂荒地胡敏酸分子量和芳化度减小,结构变得较为简单。有意思的是,除 20 年苜蓿之外,其他所有各土壤层次的 E_{465} 值与 E_{465}/E_{665} 比值呈反相关关系。

表 5 胡敏酸的可见光吸收值

土样编号	层次/cm	E_{465}	E_{665}	E_{465}/E_{665}
M20	0—20	0.427	0.068	6.28
M20	20—40	0.338	0.035	5.66
M20	40—60	0.409	0.086	4.76
M15	0—20	0.433	0.197	2.20
M15	20—40	0.493	0.203	2.43
M15	40—60	0.400	0.140	2.86
M10	0—20	0.368	0.136	2.71
M10	20—40	0.315	0.110	2.86
M10	40—60	0.322	0.128	2.52
M5	0—20	0.480	0.158	3.04
M5	20—40	0.474	0.159	2.98
M5	40—60	0.376	0.098	3.89
F5	0—20	0.642	0.179	3.64
F5	20—40	0.695	0.206	3.94
F5	40—60	0.620	0.138	4.13
L10	0—20	0.391	0.078	5.01
L10	20—40	0.262	0.059	4.44
L10	40—60	0.235	0.041	5.73

4 结 论

(1)黄绵土利用苜蓿复耕方式,土壤有机质的演化随种植年限表现出增加的特征,并可促进土壤的熟化。尤以 10~15 年期间表层土壤有机质的积累过程呈显著的增加趋势,20 年后有机质的积累速率缓慢。苜蓿地开垦为农田后,有机质有明显的下降趋势;撂荒地 20 cm 以下有机质含量明显低降低。苜蓿种植年限不能太长,以 10~15 年为宜。不同复耕方式土壤有机质呈现不同的规律性变化。耕作降低土壤有机质和腐殖质总量,特别是土壤深层含量明显减少。撂荒虽能提高有机质含量,但与种植苜蓿差异不显著,所以复耕种植苜蓿是提高土壤有机质贮量的有效途径。

(2)苜蓿种植 5~15 年有机碳、腐殖质总量及各组分含量呈递增趋势,20 年则降低;复耕作物地胡敏酸则呈降低趋势;撂荒地有机碳和胡敏酸含量明显低于种植 10 年以上苜蓿地。种植苜蓿可提高胡敏酸含量,所以复耕地苜蓿种植能明显提高土壤肥力,其原因是苜蓿为深根系的豆科植物,具有增加土壤氮素和改变土壤结构,故提高了土壤肥力。但种植苜蓿年限不能太长,种植苜蓿 5~10 年,该种大田作物有利提高土地生产率。

(3)复耕苜蓿地的腐殖质结合形态均为松结态>稳结态,撂荒地和开垦地 20—60 cm 则稳结态>松结态。苜蓿地土壤的松/稳为中层>表层>下层,说明种植苜蓿主要对 20—40 cm 土层肥力影响较大。

(4)复耕苜蓿地的腐殖质 E_{456} 值高于撂荒地。种植苜蓿 5~15 年和及其开垦地的 E_{456} 值大而 E_{456}/E_{666} 比值小,20 年苜蓿地和撂荒地则是 E_{456} 值小, E_{456}/E_{665} 比值大。说明当苜蓿种植年限在 5~15 年间,土壤胡敏酸

向着品质提高的方向演化,种植苜蓿达 20 年后与撂荒地胡敏酸品质则向相反方向演化。各土壤层次(除 20 年苜蓿地之外)的 E_{456} 值与 E_{456}/E_{665} 比值呈反相关关系。

参考文献:

- [1] 吴建国,徐德应. 土地利用变化对土壤有机碳的影响[M]. 北京:中国林业出版社,2004:1-78.
- [2] 龙健,李娟,汪境仁. 贵州中部岩溶丘陵区不同土地利用和管理方式对土壤肥力的影响[J]. 土壤通报,2006,37(2):249-252.
- [3] 庆阳地区土壤普查办公室. 甘肃庆阳土壤[M]. 兰州:甘肃科学技术出版社,1989:1-30.
- [4] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京:中国农业出版社,2002:301-320.
- [5] 熊毅,等. 土壤胶体(第二册)[M]. 北京:科学出版社,1985:55-73.
- [6] 傅积平. 土壤结合态腐殖质的分组测定[J]. 土壤通报,1983,14(2):36-37.
- [7] 严昶升. 土壤肥力研究方法[M]. 北京:农业出版社,1988:263-280.
- [8] 王鹤桥. 土壤腐殖质与土壤肥力的研究初报[J]. 腐殖酸,1994(1):35-37.
- [9] 辛刚,颜里,汪景宽,等. 不同开垦年限黑土有机质变化的研究[J]. 土壤通报,2002,33(5):332-335.
- [10] 文启孝. 土壤有机质的组成、形成和分解[J]. 土壤,1984,6(3):121-129.
- [11] 牛灵安,郝晋珉,李吉进. 盐渍土熟化过程中腐殖质特性的研究[J]. 土壤学报,2001,38(2):114-121.
- [12] 文启孝. 我国土壤有机质和有机肥研究现状[J]. 土壤学报,1989,26(3):255-261.
- [13] 陈利军,周礼恺. 土壤保肥供肥机理及其调节 II. 棕壤型园土的腐殖质结合形态及其肥力学意义[J]. 应用生态学报,1999,10(4):427-429.
- [14] 杨玉盛,邱仁辉,俞新妥,等. 不同栽植代数 29 年生杉木林土壤腐殖质及结合形态研究[J]. 林业科学,1999,35(5):116-119.

上接第 191 页

参考文献:

- [1] 马国胜,薛吉全,路海东,等. 播种时期与密度对关中灌区夏玉米群体生理指标的影响[J]. 应用生态学报,2007,18(6):1247-1253.
- [2] 翟丙年. 供水条件下施氮对作物产量及生理特性的影响[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学,2001.
- [3] Tuberosa R, Sanguineti M C, Landi P, et al. Identification of QTLs for root characteristics in maize grown in hydroponics and analysis of their overlap with QTLs for grain yield in the field at two regimes[J]. Plant Molecular Biology, 2002,48:697-712.
- [4] 王宜伦,韩燕来,张许,等. 氮磷钾配比对高产夏玉米产量、养吸收积累的影响[J]. 玉米科学,2009,17(6):88-92.
- [5] 金继运,何萍. 氮钾营养对春玉米后期碳氮代谢与粒重形成的影响[J]. 中国农业科学,1999,32(4):55-62.
- [6] 金继运,何萍. 氮钾互作对春玉米生物产量及其组分动态的影响[J]. 玉米科学,1999,7(4):57-60.
- [7] Strong W M, Barry G. The availability of soil and fertilizer phosphorus to wheat and rape at different water regimes[J]. Australian Journal of Soil Research, 1980,18:353-362.
- [8] Kuchenbuch R, Claassen N, Jungk A. Potassium availability in relation to soil moisture[J]. Plant and Soil, 1986,95:221-231.
- [9] 徐明岗,张一平. 土壤养分扩散的影响因素及其相互关系[J]. 土壤学进展,1995,23(3):13-20.
- [10] 石元春,刘昌明,龚元石. 节水农业应用基础研究进展[M]. 北京:中国农业出版社,1995:124-130.
- [11] 朱维琴,吴良欢,陶勤南. 作物根系对于干旱胁迫逆境的适应性研究进展[J]. 土壤与环境,2002,11(4):430-433.
- [12] 梁银丽,陈培元. 土壤水分和磷素营养对小麦生长生理特性的影响[J]. 西北植物学报,1994,14(5):56-60.
- [13] Rsseng R, Ritchie J T, Smucker A J M, et al. Root growth and water uptake during water deficit and recovering in *Triticumaestivum*[J]. Plant and soil, 1998,201:265-273.
- [14] 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,1999:24-214.
- [15] 董钻,谢甫绶. 大豆氮磷钾吸收动态及模式的研究[J]. 作物学报,1996,22(1):89-95.
- [16] 王贵平,张胜,王圣瑞,等. 地膜覆盖对春玉米氮磷钾吸收累积和化肥利用率的影响[J]. 内蒙古农业大学学报,2000,21(S1):157-161.
- [17] 宋海星,李生秀. 玉米生长量养分吸收量及氮肥利用率的动态变[J]. 中国农业科学,2003,36(1):71-76.
- [18] 赵营,同延安,赵护兵. 不同供氮水平对夏玉米养分累积转运及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2006,12(5):622-627.