

砾石覆盖量对农田水分与作物耗水特征的影响

冯浩^{1,2} 刘晓青^{1,2} 左亿球^{1,2} 余坤^{1,2}

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100;
2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 通过大田试验,研究夏玉米-冬小麦轮作条件下砾石覆盖量对土壤水分动态、作物耗水特征、产量及水分利用效率的影响。结果表明,砾石覆盖量的增加提高了土壤对降水的保蓄能力,且主要体现在0~40 cm土层,100~200 cm土壤贮水量变化不明显。在夏玉米-冬小麦各生育期,砾石覆盖措施提高土壤贮水量主要体现在作物苗期和拔节期,其中,S8(砾石覆盖量8 kg/m²)处理提高土壤贮水量效果最好,较无覆盖处理(CK)分别增加12.77%和6.63%。作物耗水系数随着砾石覆盖量的增加而减小。砾石覆盖夏玉米、冬小麦 W_{UE} 和 P_{UE} 分别较CK处理最大提高了33.05%、26.65%和12.68%、20.00%,差异显著。此外,作物经济产量和生物产量得到显著提高,夏玉米生长季,各处理其经济产量和生物产量分别较CK处理提高了4.45%~26.66%和5.81%~25.78%,冬小麦生长季,其经济产量和生物产量分别较CK处理提高了2.06%~15.34%和2.32%~26.49%。

关键词: 轮作; 砾石覆盖; 农田水分; 耗水系数; 水分利用效率; 作物产量

中图分类号: S152.7⁺3; S157.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)05-0155-09

Effect of Gravel Mulching Degree on Farmland Moisture and Water Consumption Features of Crops

Feng Hao^{1,2} Liu Xiaoqing^{1,2} Zuo Yiqiu^{1,2} Yu Kun^{1,2}

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Chinese National Academy of Water-saving Agriculture in Arid Region, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Field plot experiment was carried out to investigate the effects of gravel mulching degree on soil moisture dynamics, water consumption characteristic, crop yields and water use efficiency in the whole growth period of summer maize and winter wheat in the crops rotation. The results showed that gravel mulching can hold soil water storage and suppress evaporation, the increase of gravel mulching degree could improve soil storage ability for precipitation and irrigation, compared with CK, and the water storage capacity is mainly reflected in the 0~40 cm soil layer, followed by the 40~100 cm soil layer water storage, 100~200 cm soil water storage did not change obviously. The gravel mulching improving soil water storage ability was observed mainly at seedling stage of summer maize and jointing stage of winter wheat in the crops rotation system, and the gravel mulching degree of 8 kg/m² increased the soil water storage by 12.77% and 6.63% compared with CK respectively, and the effects was weakened because of the increased canopy and rainfall. The total water consumption was decreased during growing period approximately, and the water consumption coefficient was decreased with gravel mulching degree in the crops rotation systems. The water consumption percentage in each stage was increased with the increase of gravel mulching degree besides the period before jointing. Gravel mulching

收稿日期: 2015-10-20 修回日期: 2015-12-03
基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(SS2013AA100904)和西北农林科技大学基本科研业务费专项(QN2009087)
作者简介: 冯浩(1970—),男,研究员,博士,主要从事农业水土资源高效利用研究,E-mail: nercwsi@vip.sina.com

treatments significantly improved the W_{UE} and P_{UE} of summer maize and winter wheat. In the growing period of summer maize, W_{UE} and P_{UE} were increased by 33.05% and 26.65%, and the winter wheat were increased by 12.68% and 20.00% respectively. In addition, gravel mulching treatments, compared with CK, could significantly increase economic yields and biomass yields. In the growing period of summer maize, economic yields and biomass yields were increased by 4.45% ~ 26.66% and 5.81% ~ 25.78%, the winter wheat were increased by 2.06% ~ 15.34% and 2.32% ~ 26.49%, respectively.

Key words: crop rotation; gravel mulching; farmland moisture; water consumption coefficient; water use efficiency; crop yield

引言

天然降雨是中国北方旱农地区可利用的主要水资源^[1],但大多以小雨或暴雨为主,这不仅降低了作物对水分吸收的有效性,且往往会造成区域的水土流失^[2]。加之降雨时空分布不均,降雨时期与作物需水时期不同步,能被作物利用的降雨仅为总降水量的30%~40%,降雨利用效率仅为3~6 kg/(hm²·mm)^[3]。冬春季干旱多风,田间蒸发量大,土壤耕作层水分较低,作物生长受到水分的限制,造成籽粒不饱满或空秕,作物产量与水分利用效率降低^[4-5]。干旱缺水是制约旱地雨养农业生产的关键因素之一^[6],为了提高生产效率,使作物转化为生物产量和经济产量,这就要求提高作物对有限降雨的吸收率和利用率。因此,探索和推广适宜的覆盖保墒措施,提高天然降雨的有效利用,增加土壤的有效贮水量,提高作物产量和水分利用效率,已经成为备受关注的研究内容^[7],对改善我国农业生态环境具有十分重要的意义。

覆盖栽培是减少土壤水分蒸散损失的主要农艺措施^[8]。其中,农田砾石覆盖是我国一种传统的抗旱栽培方式^[9]。国内外学者对砂砾石覆盖的增温效应^[10]、水分入渗与蒸散^[10-13]、补灌增产效果^[14-15]等进行了大量研究,结果表明砾石覆盖可以保持土壤水分,减少土壤水分蒸发,增加土壤温度,提高作物产量和水分利用效率^[16]。虽然覆盖具有保水抑蒸效应,但保墒措施因覆盖材料、覆盖方式、覆盖量而不同,也与耕作方式、作物种类有关,因此需要针对不同地区、不同覆盖量、不同作物进行试验研究。砾石不同覆盖量对于夏玉米-冬小麦轮作条件下土壤水分动态、作物耗水特征、产量及水分利用效率的影响鲜见报道,有必要针对砾石覆盖在西北干旱半干旱地区的适应性及对作物生长的影响进行进一步研究。

覆盖具有保水抑蒸效应,在我国宁夏、甘肃旱区已有所应用^[17],但覆盖方式和覆盖量受气候、作物、

土壤等的影响,必须根据田间试验才能确定适宜的覆盖模式。本文以杨凌地区不同砾石覆盖量条件下冬小麦、夏玉米轮作生长试验为例进行研究,比较分析不同砾石覆盖量对土壤水分分布、作物耗水量、水分利用效率的影响,为充分发挥砾石覆盖改善农田水分状况,提高作物产量、水分利用效率和降水利用效率的作用提供科学依据,丰富农田覆盖措施体系,进一步完善覆盖技术在农业生产方面的基本理论,更好地为农业生产服务。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2014—2015年在陕西杨凌西北农林科技大学教育部农业水土工程重点实验室的灌溉试验站内进行,该试验站位于108°24'E、34°20'N,海拔高度521 m,属大陆暖温带湿润季风气候。站内地形平整,土层深厚,土壤质地为中壤土,1 m土层的平均田间持水率23%~25%,凋萎含水率8.5%(以上均为质量含水率),平均干容重为1.44 g/cm³。多年平均气温为12.9℃,年日照时数2 163.8 h,平均降水量为635.1 mm(多集中在7—10月份),且降水变化率比较大,平均蒸发量为993.2 mm。该站属渭河三道台塬地区,全年无霜期221 d,地下水埋藏较深,其向上补给量可以忽略不计。站内设有国家一般气象观测站,按照国家气象局的地面气象观测规范可获得每日的气象资料(气温、湿度、降水量、日照时数、水面蒸发量、风速、气压和地温),见图1。

1.2 试验设计

供试作物为夏玉米(品种为秦龙11)和冬小麦(品种为小偃22)。试验设计中,砾石覆盖量设5个梯度:0 kg/m²(CK)、2 kg/m²(S2)、4 kg/m²(S4)、6 kg/m²(S6)、8 kg/m²(S8),区组内各处理随机排列,每个处理设置3个重复,小区面积为3 m×5 m,在各小区边缘1 m深土层竖直铺一层塑料薄膜,以避免各个小区土壤水分发生侧向入渗。夏玉米-冬小麦均为播种之后,按照试验设计的覆盖量均匀地

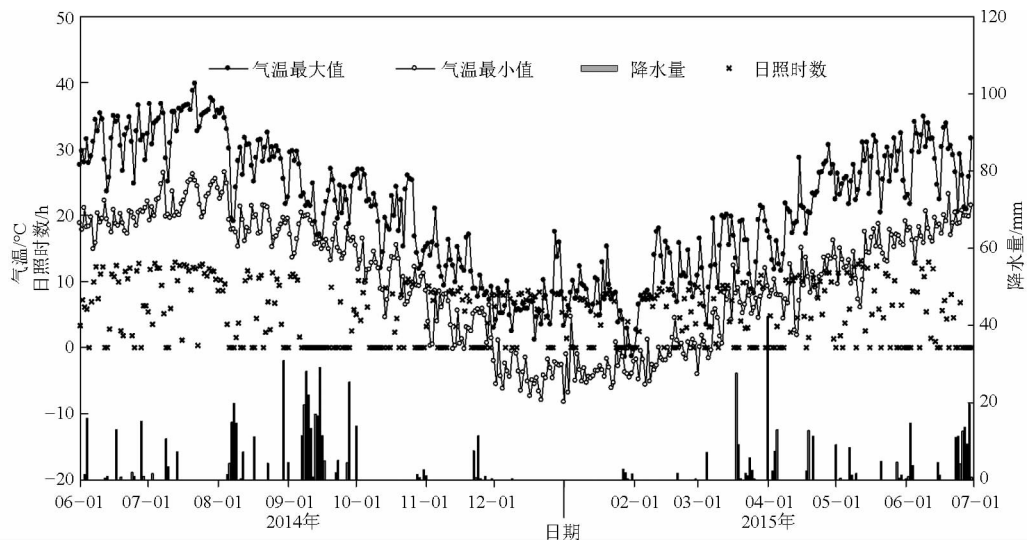


图 1 夏玉米、冬小麦生育期气象数据

Fig.1 Meteorological data of summer corn and winter wheat's growing period

把砾石铺开,期间作物收获时砾石也要一并回收。砾石粒径范围为 1 ~ 3 cm,取自于杨凌本地区渭河河滩。每个处理除地表覆盖量不同外,其他管理方式均一致,如需灌溉则采用地表漫灌方式。基肥施用量:N(尿素)、P₂O₅(磷酸二铵)分别为 150 kg/hm²、100 kg/hm²。播种前将基肥一次性翻入 0 ~ 10 cm 耕作土壤中,生育期内不追肥。

1.3 田间管理

夏玉米播种量为 45 000 株/hm²,行距为 60 cm,株距为 40 cm,打穴播种,播种深度为 5 cm,玉米在苗期进行间苗、定苗。于 2014 年 6 月 19 日播种,10 月份收获,全生育期平均天数为 110 d。夏玉米整个生育期降水量为 380.2 mm,主要集中在 8—9 月份,由于生育前期气候干旱,为了保证试验顺利进行,在 2014 年 7 月 29 日补灌 50 mm 拔节水,其他生育期完全靠雨养。

冬小麦播种量为 187.5 kg/hm²,行距 25 cm。划沟撒播,播种深度为 5 cm。于 2014 年 10 月 19 日播种,于 6 月份收获,全生育期平均天数为 230 d。在冬小麦全生育期内,降水量为 232.7 mm,气候干旱,为了保证试验顺利进行,在 2014 年 12 月 29 日和 2015 年 3 月 13 日分别补灌 50 mm 越冬水和返青水,其他生育期完全靠雨养。

1.4 测定项目和方法

1.4.1 土壤含水率

采用管式土壤水分测定系统 Trime - IPH (TDR)分层测定 0 ~ 200 cm 土壤含水率,距地面 0 ~ 40 cm 深度,每隔 10 cm 测定一次,40 cm 以下每隔 20 cm 测量一次。在作物播种前和收获后分层测定,全生育期内,测定时间间隔为 10 d,灌溉后或雨后加测一次。土壤贮水量(单位:mm)为

$$W = \frac{hd\theta}{10} \tag{1}$$

式中 h ——土层厚度,cm
 d ——土壤容重,g/cm³
 θ ——土壤质量含水率,%

1.4.2 作物耗水量

作物耗水量 ET 采用农田水量平衡方程计算,即

$$ET = P + I - R - D - \Delta W \tag{2}$$

式中 P ——某一时段内降水量,mm
 I ——某一时段内灌溉量,mm
 R ——地表径流量,mm
 D ——深层渗漏量,mm
 ΔW ——相邻 2 次取土测定土壤含水率时间间隔内根层土壤贮水量变化量,mm

本试验在平原地区进行,且土壤水分测定下边界为 200 cm,远大于计划湿润层,因此地表径流和深层渗漏可以忽略不计。

1.4.3 测产与考种

收获时夏玉米每个小区选取 12 株具有代表性的玉米进行考种,单穗脱粒,籽粒均脱水至恒质量,然后根据每公顷的株数计算单位面积的产量;冬小麦按 1 m²进行考种,脱粒干燥至恒质量,然后计算每公顷的产量,并计算作物收获指数 H_I 。

$$H_I = \frac{G_y}{B_y} \tag{3}$$

式中 G_y ——单位面积的经济产量,kg/hm²
 B_y ——单位面积的生物产量,kg/hm²

1.4.4 水分利用效率

根据冬小麦产量和生育期耗水量计算水分利用效率 W_{UE} (单位:kg/(mm·hm²)) 和降水利用效率

P_{UE} (单位: $\text{kg}/(\text{mm}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^2)$)。

$$W_{UE} = \frac{G_y}{ET}$$

(4)

$$P_{UE} = \frac{G_y}{P}$$

(5)

1.5 统计分析

试验数据采用 SigmaPlot 10.0 和 Excel 进行处理和作图,利用 SPSS 15.0 对数据进行单因素方差分析,利用 LSD 法检验差异显著性,显著水平设定

为 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同处理土壤贮水量变化分析

根据分层测定的水分,将土层分为 0 ~ 40 cm、40 ~ 100 cm、100 ~ 200 cm 3 个层次,基于实测土壤水分数据,结合式(1)分别计算各处理不同土层的贮水量变化,夏玉米和冬小麦不同生育期各处理土壤贮水量的变化见图 2。

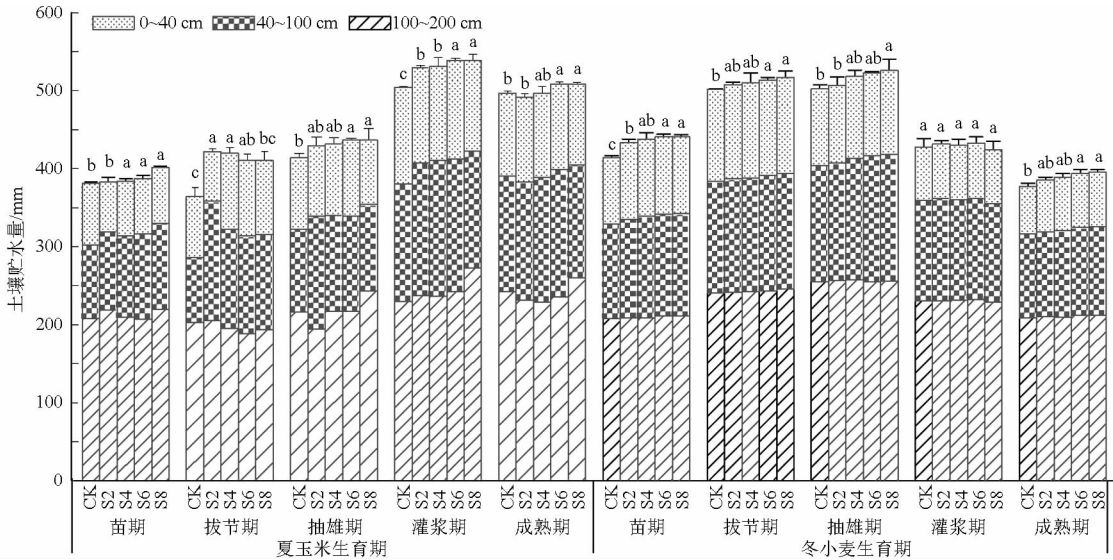


图2 夏玉米、冬小麦各处理不同生育期土壤贮水量变化

Fig.2 Accumulation amounts of soil water in summer maize and winter wheat growth period between different treatments

土壤贮水量的变化与作物的生长发育及研究区的降水相关。由图2中可以看出:

(1)对比不同土层,整个生育期内,各处理表层0 ~ 40 cm 贮水量变化最为明显,尤其是降雨和灌水后0 ~ 40 cm 土壤贮水量增加明显。整个生育期,受降雨和灌溉的影响,夏玉米、冬小麦成熟期S8处理土壤贮水量较CK分别增加17.03%、9.08%;而深层100 ~ 200 cm 土壤贮水量则不易受降雨、灌溉等的影响,变化幅度较小。

(2)对比不同覆盖量处理,各层贮水量基本都随着覆盖量的增加而增大,气候干旱时表现较为明显,分析原因可能是覆盖处理阻碍了土壤水分向大气逸散的通道,抑制了土壤水分的无效蒸发,进而提高了土壤含水率,且覆盖量越大,抑制效果越好,土壤贮水量越高。结果表明砾石覆盖可以有效地减少土壤水分蒸发,保持土壤水分,且覆盖量越大,作用效果越显著,这有利于作物前期的生长和后期产量的形成。

(3)对比不同生育期,由夏玉米各生育阶段0 ~ 200 cm 土层土壤贮水量动态变化可知,在苗期和拔节期各处理0 ~ 200 cm 土壤贮水量均较低,这是由于播种到拔节期间,降雨较少,气温较高,各处理间,

覆盖处理土壤贮水量显著高于CK;拔节期S8、S6、S4、S2处理0 ~ 200 cm 土壤贮水量较CK分别增加15.75%、15.24%、12.77%、12.77%,说明覆盖处理在拔节期有效提高了土壤贮水量。这可能是由于作物生长初期,冠层覆盖度较小,且日照强度大,砾石覆盖阻碍了土壤水分向大气逸散的通道,降低了土壤的无效蒸发,进而提高了0 ~ 200 cm 土层土壤贮水量。灌浆期和成熟期,因多降雨,各处理土壤贮水量较其他生育期有明显增加,砾石覆盖S6、S8处理0 ~ 200 cm 土壤贮水量差异不明显,但较S2、CK具有显著差异。这可能是由于作物耗水量和冠层覆盖度较之前生育阶段有明显增加,因此冠层覆盖对贮水量的影响较砾石覆盖大,S6、S8处理之间差异不明显。但由于初期覆盖量大的处理土壤含水率较高,水分供应充足,对作物生长发育有利,其长势较S2、CK好,所以S6、S8处理较S2、CK具有显著差异。

由冬小麦不同生育期0 ~ 200 cm 土层土壤贮水量动态变化可知,在冬小麦苗期,S8、S6、S4、S2处理土壤贮水量较CK分别增加4.73%、5.71%、6.55%、6.63%,这可能是该时期气候干旱,覆盖措施有效减少了土壤表层的蒸发,提高了土壤贮

水量。进入拔节期后,各覆盖处理间 0 ~ 200 cm 土壤贮水量无显著性差异,这是由于对各小区进行了等量灌溉处理。抽穗期 S8、S6、S4 各处理之间差异不明显,但较 CK 差异显著,这是由于作物需水量增加,但较多的降水量和叶面积指数的增加使得砾石覆盖各处理之间差异不显著,但较 CK 差异明显。灌浆期,由于大量降雨使得各处理之间无明显差异。成熟期各处理 0 ~ 200 cm 土壤贮水量有所下降,这可能是冬小麦生殖生长速率加快,干物质的积累及光合产物向籽粒的转化消耗水分较多所致。

2.2 作物各阶段耗水特征分析

轮作夏玉米-冬小麦试验,各处理阶段耗水模系数、总耗水量和耗水系数如表 1 所示。由表 1 可知,夏玉米试验 CK 处理田间总耗水量均显著低于其他处理,且随覆盖量增加呈增大趋势;冬小麦 S8 处理

总耗水量均显著大于 CK、S2、S4,CK 较 S2、S6 不显著。拔节期之前 CK 处理耗水模系数大于其他处理,这可能是因为夏玉米-冬小麦拔节之前,降水较少,气候干旱,蒸发较强,而砾石覆盖措施阻碍了土壤水分向大气逸散的通道,减少了土壤水分的无效蒸发,加之冬小麦越冬期历时较长,使得拔节期之前 CK 耗水量增加,耗水模系数增大。表 1 中各处理耗水系数由大到小依次为 CK、S2、S4、S6、S8,相关研究^[18]表明,产量越高耗水系数越小,本文研究表明,砾石覆盖降低了作物耗水系数,提高了旱地的农业生产力。对比不同覆盖量处理,播种-拔节期作物生长耗水量较小,土壤表层蒸发所占耗水量比例较大,而覆盖可以减少水分蒸发,因此耗水模系数随覆盖量的增加有所减小;抽穗-成熟期,作物生殖生长消耗水分较多,占总耗水量比例有所增加,即耗水模系数随覆盖量增加而增大。

表 1 轮作条件下作物阶段耗水特征分析

Tab.1 Analysis of different treatments on water consumption features of summer maize and winter wheat rotation systems

作物	处理	耗水模系数/%					总耗水量/	耗水系数/
		播种-拔节期	拔节-开花期	开花-抽穗期	抽穗-灌浆期	灌浆-成熟期	mm	(mm·kg ⁻¹ ·hm ⁻²)
夏玉米	CK	5.16 ^a	15.75 ^a	25.05 ^a	18.20 ^c	35.85 ^c	244.81 ^c	0.0603 ^a
	S2	4.44 ^b	15.72 ^b	24.44 ^b	19.16 ^b	36.24 ^{bc}	248.86 ^{bc}	0.0593 ^a
	S4	4.45 ^b	15.76 ^a	24.12 ^c	19.22 ^{ab}	36.45 ^b	253.65 ^{ab}	0.0545 ^b
	S6	4.36 ^{bc}	15.77 ^a	24.15 ^c	19.25 ^{ab}	36.47 ^b	255.64 ^b	0.0506 ^{bc}
	S8	4.27 ^c	15.71 ^b	24.18 ^{bc}	19.30 ^a	36.54 ^a	254.34 ^a	0.0493 ^c
冬小麦	CK	40.86 ^a	10.80 ^b	8.98 ^b	9.40 ^c	29.96 ^c	400.23 ^b	0.0407 ^a
	S2	40.80 ^a	10.80 ^b	9.00 ^{ab}	9.42 ^c	29.97 ^c	399.91 ^b	0.0399 ^b
	S4	40.78 ^a	10.81 ^b	8.88 ^c	9.50 ^a	30.03 ^b	396.67 ^c	0.0391 ^b
	S6	40.72 ^b	10.82 ^{ab}	8.93 ^a	9.45 ^b	30.08 ^a	403.72 ^{ab}	0.0380 ^{bc}
	S8	40.62 ^c	10.84 ^a	8.95 ^a	9.48 ^b	30.10 ^a	411.68 ^a	0.0353 ^c

注:同列不同字母表示处理间差异显著(α<0.05)。

夏玉米 S8、S6、S4、S2 总耗水量分别较 CK 增加 3.89%、4.42%、3.61%、1.65%。有研究表明,夏玉米的籽粒产量与耗水量呈二次函数关系,随总耗水量的增加,其籽粒产量也不断增加^[19],与本文的研究结果一致。夏玉米各处理不同生长发育阶段,灌浆-成熟期农田耗水量占总耗水量的比例最大,耗水模系数最大,播种-拔节期气候干旱,作物生长耗水少,使得耗水量所占比例最小,即耗水模系数最小。

冬小麦试验期间,S8、S6 总耗水量分别较 CK 增加 0.87%、2.36%。耗水量增加,籽粒产量也相应增加,耗水系数随之减小。各处理均表现为播种-拔节期耗水模系数最大,可能由于播种-拔节期阶段历时最长,气候干旱,地表冠层覆盖率较低,土壤无效蒸发较强所致。其次灌浆-成熟期耗水模系数较大,因为灌浆期后,冬小麦生殖生长速率加快,干物质的积累及光合产物向籽粒的转化消耗了较多的水分。

开花-抽穗期耗水模系数最小。

2.3 作物产量及其构成因素分析

2.3.1 夏玉米产量及其构成因素的分析

夏玉米产量及其构成因素的一些特征值见表 2。

由表 2 可知,不同砾石覆盖量的处理对夏玉米的产量特征值具有显著差异。S2、S4、S6、S8 处理经济产量较 CK 分别增加 4.45%、11.75%、17.00%、26.66%;地上部生物量较 CK 分别增加 5.81%、11.20%、20.14%、25.78%;收获指数 H_i 范围为 0.351~0.362,且 S8、S6 较 CK 差异显著,说明砾石覆盖对收获指数具有显著影响。

产量构成因素方面,各覆盖处理夏玉米果穗粗、穗粒数随覆盖量的增加均呈增加趋势;百粒质量随覆盖量增加呈减小趋势,S8 处理百粒质量与 CK 差异显著,这可能是由于穗粒数的增加导致单个籽粒分配的营养物质减少,进而干物质减少。S4、S6、S8

表 2 夏玉米产量及其构成因素的影响

Tab.2 Effect of gravel mulching degree treatments on yield and its components of summer maize

处理	果穗粗/mm	穗粒数	百粒质量/g	经济产量/(kg·hm ⁻²)	地上部生物量/(kg·hm ⁻²)	H _I
CK	50.72 ^c	455.5 ^b	52.44 ^a	4381 ^d	12169 ^c	0.360 ^b
S2	50.39 ^c	458.1 ^b	51.52 ^{ab}	4576 ^{cd}	12877 ^{bc}	0.355 ^{bc}
S4	51.13 ^{bc}	467.7 ^{ab}	50.35 ^{ab}	4896 ^c	13533 ^b	0.362 ^{ab}
S6	51.77 ^b	473.9 ^{ab}	49.37 ^{ab}	5126 ^b	14620 ^{ab}	0.351 ^c
S8	52.98 ^a	505.1 ^a	48.79 ^b	5549 ^a	15307 ^a	0.362 ^a

注:果穗粗、穗粒数、百粒质量和地上部生物量与经济产量的相关系数分别为 0.81、0.92、-0.98 和 0.97。

处理穗粒数较 CK 分别增加 2.68%、4.04%、10.89%,且差异显著。可能是在灌浆期叶片生产和积累的有机物质转移到籽粒中,而覆盖量的增加能够有效贮存降水量,保证籽粒形成过程中水分的供应,使得穗粒数增加。相关性分析结果表明,经济产量和穗粒数相关性最大,相关系数达 0.92,说明提

高穗粒数是增产的主要途径;地上部生物量与经济产量相关系数达 0.97,表明地上部干物质的积累是产量形成的基础。

2.3.2 冬小麦产量及其构成因素的分析

冬小麦产量及其构成因素的一些特征值见表 3。

表 3 冬小麦产量及其构成因素的影响

Tab.3 Effect of gravel mulching degree treatments on yield and its components of winter wheat

处理	1 m ² 有效穗数/穗	穗粒数	千粒质量/g	经济产量/(kg·hm ⁻²)	地上部生物量/(kg·hm ⁻²)	H _I
CK	597 ^c	34.13 ^a	44.8 ^c	5712 ^c	15060 ^c	0.379 ^a
S2	621 ^{bc}	33.57 ^{ab}	45.7 ^{bc}	5830 ^{bc}	15410 ^c	0.378 ^a
S4	660 ^b	33.26 ^{ab}	46.0 ^{bc}	5949 ^{bc}	16990 ^b	0.350 ^{bc}
S6	664 ^b	33.12 ^{ab}	47.4 ^b	6130 ^{ab}	17217 ^{bc}	0.356 ^b
S8	775 ^a	32.93 ^b	51.1 ^a	6588 ^a	19050 ^a	0.346 ^c

注:1 m²有效穗数、穗粒数、千粒质量和地上部生物量与经济产量的相关系数分别为 0.95、0.96、-0.81 和 0.94。

由表 3 可知,S2、S4、S6、S8 处理经济产量较 CK 分别增加 2.06%、4.15%、7.32%、15.34%;地上部生物量较 CK 分别增加 2.32%、12.81%、14.32%、26.49%,差异显著,说明砾石覆盖量的增加,促进了冬小麦干物质的积累和产量的形成,与夏玉米结果一致。产量构成因素方面,随覆盖量的增加,冬小麦有效穗数和穗粒数均呈增加趋势,覆盖处理有效穗数较 CK 差异显著,在穗粒数方面,仅 S8 处理与其他各处理存在显著性差异。其中 S6、S8 有效穗数分别较 CK 增加 11.22%、29.81%,由于土壤干旱时,影响分蘖生长,形成分蘖空位或不分蘖的独籽苗,而覆盖措施能有效利用降雨,增加土壤贮水量,增加冬小麦的分蘖数,提高单位面积内的有效穗数^[20]。随覆盖量的增加,冬小麦千粒质量均呈减小趋势,说明有效穗数的增加致使单个籽粒分配的营养物质减小,干物质质量减小。S4、S6、S8 处理穗粒数与 CK 差异显著,较 CK 分别增加 2.68%、5.80%、14.06%。相关性分析表明,经济产量与单位面积有效穗数、穗粒数相关性很大,相关系数达 0.95、0.96,说明提高有效穗数或穗粒数是增产的主要途径;与夏玉米相似,冬小麦地上部生物量与经济产量相关系数达 0.94,说明干物质的积累是产量形成的基础。

对比夏玉米和冬小麦产量特征值可知,砾石覆

盖量的增加可以保持土壤水分,提高土壤持水率。为作物生长提供必要水分,促进作物生长发育,使得作物穗粒数得到显著增加,进而提高作物最终产量和生物量。由作物产量特征分析可知,砾石覆盖量的增加对夏玉米的增产效应较冬小麦显著,说明砾石覆盖措施可能对稀疏作物的种植更为有效。

2.4 水分利用效率及降水利用效率

W_{UE} 是衡量一个地区农业水资源利用水平高低和节水措施的一项重要指标, P_{UE} 则能反映旱地农业生产中降水的有效潜力^[21]。夏玉米、冬小麦的 W_{UE} 和 P_{UE} 如图 3 所示。轮作条件下各处理 W_{UE} 较 CK 均有显著差异,且夏玉米明显高于冬小麦。夏玉米 S2、S4、S6、S8 分别较 CK 提高 2.99%、10.00%、22.26%、33.05%;冬小麦 S2、S4、S6、S8 分别较 CK 提高 4.77%、5.08%、6.39%、12.68%。由此可知,砾石覆盖措施能有效提高作物 W_{UE} ,且覆盖量越大效果越显著。原因可能是砾石覆盖在提高土壤持水能力、减少土壤水分无效消耗的同时,促进作物生长、提高作物产量与 W_{UE} 。对比夏玉米冬小麦统计分析结果可知,砾石覆盖措施对夏玉米 W_{UE} 的提高比冬小麦显著,说明此项覆盖措施对稀疏作物效果较好。

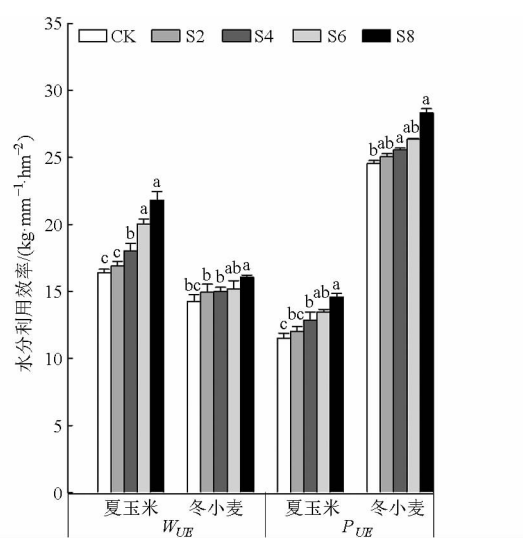


图 3 夏玉米、冬小麦各处理 W_{UE} 与 P_{UE}

Fig. 3 Water use efficiency and precipitation use efficiency of different treatments on summer maize and winter wheat

由 P_{UE} 分析结果可知,冬小麦对降雨的利用效率要显著高于夏玉米,这可能是由于冬小麦生育期较夏玉米长,且冬小麦生长季降雨较少,因此冬小麦 P_{UE} 高于夏玉米。轮作条件下覆盖措施 P_{UE} 均显著高于 CK 处理。夏玉米生长季, S2、S4、S6、S8 处理 P_{UE} 分别较 CK 提高 4.43%、11.81%、17.01%、26.65%;冬小麦生长季 S2、S4、S6、S8 处理 P_{UE} 分别较 CK 提高 2.69%、5.41%、9.54%、20.00%。对比夏玉米、冬小麦 P_{UE} 可以看出,砾石覆盖处理对夏玉米 P_{UE} 提高效果较冬小麦更为有效。

3 讨论

砾石覆盖作为一种因地制宜的覆盖措施,可较好地适应干旱半干旱地区的气候、地理、土壤等条件,有效保持土壤水分,提高土壤水分利用效率、降水利用效率及增加作物产量,在农业生产方面得到了广泛的应用^[22]。砾石覆盖还能改善土壤环境和增加土壤微生物数量^[22],与露地对照相比,砂砾石覆盖明显改善土壤中的根际微生物区系,显著提高各类微生物数量,增强酶活性^[23]。宋日权等^[24]以不同覆砂厚度为试验因子,研究发现覆砂可以显著减少土壤蒸发量,且随着覆盖厚度的增大减少的越多。张瑞喜等^[25]通过室内土柱蒸发模拟试验,研究发现随着覆砂厚度的增大,其抑制潜水蒸发的作用越大,3.6 cm 与 5.7 cm 的抑制率分别达到 95% 和 97%。MODAIHSH 等^[26]通过砂石覆盖厚度对土壤蒸发影响的试验研究,指出砂石覆盖能有效抑制土壤水分蒸发,且厚度越大其抑制作用越大。甘肃砂田在战胜干旱与保证作物高额而稳定的产量方面具有特殊功效,但是它也具有寿命短促与机械化困难

2 个严重的缺点^[27],其基本原因是耕作过程中砂石容易和土壤混合。本试验为了克服这种缺点,采用粒径为 1 ~ 3 cm 的砾石进行土壤表层覆盖。

砾石覆盖作为一种传统的抗旱栽培措施,能够抑制土壤蒸发,提高降水有效利用率,使土壤含水率保持在较高水平,满足作物生长需要,以达到补灌增产的效果^[14-15]。半干旱地区,作物产量主要依赖于生育期间的有效降水和播种前的土壤蓄水^[28-29],尤其在干旱年份,由于气候干燥,降雨后,地表蒸发强烈,土壤含水率下降很快,难以满足作物生长需要,因此对农田采用保护性耕作措施,有利于将降雨贮存在深层土壤,以供作物生长需要^[30],同时,夏玉米-冬小麦的轮作体系具有良好的蓄水保墒作用^[31]。砾石覆盖措施对土壤贮水量及水分利用效率影响较大,其与作物生育期降水量分配关系密切,而且其密切程度与砾石覆盖量又紧紧相关。此外,砾石覆盖还具有协调养分供应、提高作物产量和水分利用效率的作用,并在干旱地区得到了广泛应用^[9,16]。本试验研究结果表明,砾石覆盖能够有效提高 0 ~ 200 cm 土壤贮水量,主要体现在 0 ~ 40 cm 土层的水量变化,尤其是在作物生长初期(苗期-拔节期),后期由于冠层和降雨的增加,蓄水效应减弱;由作物耗水特征可知,砾石覆盖降低了作物耗水系数,提高了旱地的农业生产力,且随砾石覆盖量的增加,各处理较对照差异越显著。与 CK 比较,砾石覆盖措施能贮存降雨,有效提高水分利用效率和降水利用效率,且利用效率的高低与覆盖量相关,覆盖量增加效率相应提高,夏玉米、冬小麦 S8 较 CK 分别提高了 33.05%、26.65%。

本文主要针对砾石不同覆盖量进行大田试验研究,结果表明砾石覆盖具有蓄水保墒、提高水分利用效率和降水利用效率、抑蒸增产的效应,提升了农田综合效应,这对于指导农业水资源高效利用及提高作物产量等方面具有重要的科学价值与实际意义。研究砾石覆盖条件下的农田水分、耗水特征及作物产量状况,将有利于指导生产实际,丰富农田覆盖措施体系,进一步完善覆盖技术在农业生产方面的基本理论,更好地为农业生产服务。

4 结论

(1)砾石覆盖能有效提高土壤对降水的保蓄能力,增加 0 ~ 200 cm 土壤贮水量,贮水量的变化主要体现在 0 ~ 40 cm 土层,深层 100 ~ 200 cm 土壤贮水量变化较小,且砾石覆盖量越大,变化较 CK 越显著,尤其是在作物生长初期,夏玉米拔节期 S8 处理较 CK 0 ~ 200 cm 贮水量增加 12.77%,冬小麦苗期

S8 较 CK 增加 6.63%, 后期蓄水效应减弱。

(2) 作物耗水系数随覆盖量的增加而减小。不同生长发育阶段, 夏玉米灌浆-成熟期耗水模系数最大, 苗期-拔节期耗水模系数最小; 冬小麦播种-拔节期耗水模系数最大, 灌浆-成熟期次之, 开花-抽穗期最小。

(3) 砾石覆盖能显著提高作物的经济产量和生物产量, 随覆盖量增加, 增产效果显著。其中, 夏玉

米生长季 S8 处理经济产量和生物产量分别较 CK 提高了 26.66% 和 25.78%, 冬小麦生长季 S8 处理分别较 CK 提高了 15.34% 和 26.49%。

(4) 砾石覆盖措施较对照能有效提高夏玉米、冬小麦的 W_{UE} 和 P_{UE} 。夏玉米生长季, S8 处理 W_{UE} 和 P_{UE} 分别较 CK 提高 33.05% 和 26.65%, 冬小麦生长季 S8 处理 W_{UE} 和 P_{UE} 分别较 CK 提高 12.68% 和 20.00%。

参 考 文 献

- 李尚中, 樊廷录, 王勇, 等. 不同覆膜集雨种植方式对旱地玉米叶绿素荧光特性、产量和水分利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(2): 458-466.
LI Shangzhong, FAN Tinglu, WANG Yong, et al. Effects of plastic film mulching and rain harvesting modes on chlorophyll fluorescence characteristics, yield and water use efficiency of dryland maize[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(2): 458-466. (in Chinese)
- LI X Y, GONG J D. Effects of different ridge furrow ratios and supplemental irrigation on crop production in ridge and furrow rainfall harvesting system with mulches[J]. Agricultural Water Management, 2002, 54(3): 243-254.
- 王彩绒, 田霄鸿, 李生秀. 沟垄覆膜集雨栽培对冬小麦水分利用效率及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(2): 208-214.
WANG Cairong, TIAN Xiaohong, LI Shengxiu. Effects of plastic sheet-mulching on ridge for rain water-harvesting cultivation on WUE and yield of winter wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(2): 208-214. (in Chinese)
- 任小龙, 贾志宽, 丁瑞霞, 等. 我国旱区作物根域微集水种植技术研究进展及展望[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(3): 83-89.
REN Xiaolong, JIA Zhikuan, DING Ruixia, et al. Progress and prospect of research on root-zone water micro-collecting farming for crop in arid region of China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(3): 83-89. (in Chinese)
- 刘文国, 张建昌, 曹卫贤, 等. 多种栽培模式下旱地小麦土壤水分的动态变化[J]. 西北农业学报, 2006, 15(4): 112-116.
LIU Wenguo, ZHANG Jianchang, CAO Weixian, et al. The dynamic variation of soil moisture on the dryland wheat under various culture models[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2006, 15(4): 112-116. (in Chinese)
- 王罕博, 龚道枝, 梅旭荣, 等. 覆膜和露地旱作春玉米生长与蒸散动态比较[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 88-94.
WANG Hanbo, GONG Daozhi, MEI Xurong, et al. Dynamics comparison of rain-fed spring maize growth and evapotranspiration in plastic mulching and un-mulching fields[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(22): 88-94. (in Chinese)
- 段喜明, 吴普特, 白秀梅, 等. 旱地玉米垄膜沟种微集水种植技术研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(1): 143-146.
DUAN Ximing, WU Pute, BAI Xiumei, et al. Micro-rainwater catchment and planting technique of ridge film mulching and furrow seeding of maize in dryland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(1): 143-146. (in Chinese)
- 赵永敢, 王婧, 李玉玉, 等. 秸秆隔层与地膜覆盖有效抑制潜水蒸发和土壤返盐[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 109-117.
ZHAO Yonggan, WANG Jing, LI Yuyi, et al. Reducing evaporation from phreatic water and soil resalinization by using straw interlayer and plastic mulch[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(23): 109-117. (in Chinese)
- BURNS R G. Enzyme activity in soil: location and a possible role in microbial ecology[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1982, 14(5): 423-427.
- 贾登云, 曾希琳, 张永洋, 等. 籽用西瓜早砂田覆膜栽培技术试验[J]. 中国西瓜砂田, 1998(1): 20-21.
- NACHTERGAELE J, POESEN J W, VAN WESEMAEL B. Gravel mulching in vineyards of southern Switzerland[J]. Soil and Tillage Research, 1998, 46(1-2): 51-59.
- LAMB J, CHAPMAN J E. Effect of surface stones on erosion, evaporation, soil temperature and soil moisture[J]. Agronomy Journal, 1943, 35(7): 567-578.
- WILLIAM J, GALE R W. Sandy fields traditional farming for water conservation in China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1993, 48(6): 474-477.
- LI X Y, ZHANG R L, GONG J D, et al. Soil and water accumulation by gravel and sand mulches in western loess plateau of northwest China[C]//Proceedings of the 12th ISCO Conference, 2002: 192-197.
- 王天送, 苏贺昌, 杨世维. 兰州地区砂田土壤的水分特征[J]. 干旱地区农业研究, 1991(1): 66-69.
WANG Tiansong, SU Hechang, YANG Shiwei. Soil moisture behaviours in pebble-mulched fields in Lanzhou area[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1991(1): 66-69. (in Chinese)
- LI X Y. Gravel-sand mulch for soil and water conservation in the semiarid loess region of northwest China[J]. CATENA, 2003, 52(2): 105-127.
- 邱阳, 王亚军, 谢忠奎, 等. 砾石覆盖对农田土壤有机质、微生物和土壤酶活性的影响[J]. 水土保持通报, 2011, 20(10): 176-180.

QIU Yang, WANG Yajun, XIE Zhongkui, et al. Temporal effects of gravel-sand mulching on soil microbial population and soil enzyme activity in croplands with continuous cultivation[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011,20(10):176 – 180. (in Chinese)

18 史俊通,杨改河,唐拴虎,等. 用耗水系数作为旱区农业生产力水平区划指标的探讨[J]. 干旱地区农业研究,1995,13(1): 100 – 104.

SHI Juntong, YANG Gaihe, TANG Shuanhu, et al. Using water consumption coefficients as reginonalization indexes for agricultural productivity in the arid areas[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1995,13(1):100 – 104. (in Chinese)

19 邱新强,路振广,张玉顺,等. 不同生育时期干旱对夏玉米耗水及水分利用效率的影响[J]. 中国农学通报,2013,29(27): 68 – 75.

QIU Xinqiang, LU Zhenguang, ZHANG Yushun, et al. Effects of drought in different growth stages on water consumption and water use efficiency of summer maize[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013,29(27):68 – 75. (in Chinese)

20 成林,刘荣花,马志红. 缺水和灌水对冬小麦产量影响评估[J]. 干旱地区农业研究,2012,30(2):101 – 106.

CHENG Lin, LIU Ronghua, MA Zhihong. Evaluation the influence of water deficit and irrigation on yield of winter wheat[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012,30(2):101 – 106. (in Chinese)

21 余坤,冯浩,李正鹏,等. 秸秆还田对农田土壤水分与冬小麦耗水特征的影响[J]. 农业机械学报,2014,45(10):116 – 123.

YU Kun, FENG Hao, LI Zhengpeng, et al. Effects of different pretreated straw on soil water content and water consumption characteristics of winter wheat [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(10):116 – 123. (in Chinese)

22 逢蕾,肖洪浪,谢忠奎,等. 砂田不同覆盖方式对土壤微生物组成的影响[J]. 中国沙漠,2012,32(2):351 – 358.

PENG Lei, XIAO Honglang, XIE Zhongkui, et al. Effect of gravel-sand mulching on soil microbial composition[J]. Journal of Desert Research, 2012,32(2):351 – 358. (in Chinese)

23 康恩祥,何宝林,刘晓伟. 不同粒径砂砾石覆盖对砂田西瓜土壤微生物和酶活性的影响[J]. 长江蔬菜, 2012(24):52 – 54.

KANG Enxiang, HE Baolin, LIU Xiaowei. Variation of microbial biomass and enzyme activities in gravel-sand mulching soil with different particle sizes of watermelon field[J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2012(24):52 – 54. (in Chinese)

24 宋日权,褚贵新,张瑞喜,等. 覆砂对土壤入渗、蒸发和盐分运移的影响[J]. 土壤学报,2012,49(2):282 – 288.

SONG Riquan, ZHU Guixin, ZHANG Ruixi, et al. Effects of sand mulching on soil infiltration, evaporation and salt distribution [J]. Acta Pedologica Sinica, 2012,49(2):282 – 288. (in Chinese)

25 张瑞喜,褚贵新,宋日权,等. 不同覆砂厚度对土壤水盐运移影响的实验研究[J]. 土壤通报,2012,43(4):849 – 853.

ZHANG Ruixi, ZHU Guixin, SONG Riquan, et al. Research on the effect of sandy mulching thickness on soil salt and water movement[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012,43(4):849 – 853. (in Chinese)

26 MODAIHSH A S. Soil water evaporation suppression by sand mulches[J]. Soil Science,1985,139(4):357 – 361.

27 吕忠恕,陈邦瑜,田春如. 甘肃砂田改良的一种方法[J]. 土壤学报, 1958,6(1):65 – 69.

LÜ Zhongshu, CHEN Bangyu, TIAN Chunru. A modification of the sand mulch system in kansu[J]. Acta Pedologica Sinica, 1958,6(1):65 – 69. (in Chinese)

28 解文艳,樊贵盛,周怀平,等. 秸秆还田方式对旱地玉米产量和水分利用效率的影响[J]. 农业机械学报,2011,42(11):60 – 67.

XIE Wenyan, FAN Guisheng, ZHOU Huaiping, et al. Effect of straw-incorporation on corn yield and water use efficiency in arid farming areas [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(11):60 – 67. (in Chinese)

29 严昌荣,居辉,彭世琪,等. 中国北方旱农地区农田水分动态变化特征[J]. 农业工程学报,2002,18(2):11 – 14.

YAN Changrong, JU Hui, PENG Shiqi, et al. Soil moisture dynamic characteristics of dryland field in northern China[J]. Transactions of the CSAE,2002,18(2):11 – 14. (in Chinese)

30 秦红灵,高旺盛,马月存,等. 两年后免耕后深松对土壤水分的影响[J]. 中国农业科学,2008,41(1):78 – 85.

QIN Hongling, GAO Wangsheng, MA Yuecun, et al. Effects of subsoiling on soil moisture under no-tillage 2 years later[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008,41(1):78 – 85. (in Chinese)

31 马月存,秦红灵,高旺盛,等. 农牧交错带不同耕作方式土壤水分动态变化特征[J]. 生态学报,2007,27(6):2524 – 2530.

MA Yuecun, QIN Hongling, GAO Wangsheng, et al. Dynamics of soil water content under different tillage in agriculture-pasture transition zone[J]. Acta Ecologica Sinica,2007,27(6):2524 – 2530. (in Chinese)