

绿洲农业不同种植方式防止土壤风蚀和保持土壤水分的比较*

苏培玺** 赵爱芬 杜明武

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

【摘要】 2001年~2002年,在河西走廊中断黑河中游,研究了不同方式对春季就地起沙、风速梯度、水分保持等方面的效应.结果表明,冬灌免耕、粮草间作和早春覆膜措施都不同程度地遏制了就地起沙,减少了土壤风蚀.早春覆膜在减少土壤风蚀量的同时,提高了土壤蓄水量,比春耕裸露农田蓄水量增加了35.6%.目前,春耕播种裸地是形成沙尘暴和浮尘的粉尘含量的主要来源之一,黑河中、上游农田耕地每年产生的粉尘输移量达 $4.8 \times 10^6 \sim 6.0 \times 10^6$ t,高于同区域沙漠粉尘输移量.河西走廊粉尘输移量 1 hm^2 农田相当于 1.5 hm^2 沙漠.

关键词 绿洲农业 种植方式 粮草间作 土壤风蚀 土壤水分

文章编号 1001-9332(2004)09-1536-05 **中图分类号** S714 **文献标识码** A

Functions of different cultivation modes in oasis agriculture on soil wind erosion control and soil moisture conservation. SU Peixi, ZHAO Aifen, DU Mingwu (*Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2004, 15(9): 1536~1540.

During 2001~2002, the effects of different cultivation modes including winter irrigation and zero tillage, crop-grass intercropping, and early spring film mulching on sand entrainment, wind velocity gradient and soil moisture conservation were studied in the middle reaches of the Heihe River in the Hexi Corridor region. The results showed that all these modes could reduce soil wind erosion and halt sand entrainment to different degrees. Compared with the bare fields exposed by spring plowing, early spring film mulching could increase soil moisture storage by 35.6%. At present, spring plowing and sowing was a main factor responsible to the occurrence of sand storms and the increase in suspended dust content. Farmlands in the upper and middle reaches of the Heihe River generally produced a dust transport up to $4.8 \sim 6.0$ million tons per year, which was higher than that of sandy desert in the same region. In the Hexi Corridor region, the suspended dust amount produced from 1 hm^2 farmland was equivalent to that of 1.5 hm^2 desert.

Key words Oasis agriculture, Cultivation mode, Crop-grass intercropping, Soil wind erosion, Soil moisture.

1 引言

绿洲农业(或称灌溉农业)是荒漠地区人们根据作物生育期和农业生产水平,利用灌溉设施提取水源从事的农业生产活动.广义的绿洲农业是指荒漠地区人们以灌溉方式从事的一切农业生产经营活动,归纳为3个方面:1)节水农业.如何使渠系水利用率、田间水利用率和作物水利用率优化组合^[22]; 2)经济效益.如何提高绿洲农业收益,增加农民收入; 3)环境.如何生产绿色食品,防止农田起沙,减轻沙尘暴.三者相互制约,相互促进,任何一个问题都会产生瓶颈效应.绿洲环境建设是绿洲可持续发展的保证,绿洲农田遭受风蚀是造成绿洲土地退化、作物缺苗和减产的重要因素.沙尘暴的产生和粉尘含量的加大,与农田翻耕、地表裸露紧密相关.土壤耕作中的地表结构破损导致的土壤风蚀一直是农业生

产中的重要问题.土壤风蚀特征和模型的研究,以及土壤性状与风蚀量之间的定量关系是建立土壤风蚀预报系统的基础^[13,31].该系统包括气象、土壤、水文、耕作、作物、侵蚀过程等子系统^[1,10].地表结构破损,减弱了土壤的抗风蚀能力^[4,8].人为地表结构破损程度与土壤风蚀强度之间的定量关系研究表明^[6],地表破损率愈大,风蚀率随风速的增加率亦愈大.风蚀率随地表结构破损率增大而增加的过程并非渐变过程,而是具有动态超稳定平衡系统行为.不同的农业种植方式对农田的破损程度不同,影响作物的生理生态特性^[3],改进农业种植方式可以显著提高作物产量^[30].土壤水分状况影响土壤风

* 中国科学院知识创新工程项目(KZCX3-SW-329)和中国科学院重大资助项目(KZCX1-09-02).

** 通讯联系人.

2003-07-28收稿,2004-03-04接受.

蚀,土壤湿度与风蚀量呈负相关^[14]。本文通过野外对比观测研究,从绿洲冬灌免耕、粮草间作和早春覆膜等方面,探讨绿洲农业不同种植方式的效应。

2 研究地区与研究方法

2.1 研究地区概况

试验区位于甘肃省河西走廊中段临泽县北部,绿洲外与巴丹吉林沙漠南缘相接,依赖黑河水,为典型的沙漠绿洲,属干旱荒漠气候类型,多年平均降水量 116.8 mm,年蒸发量

2 390 mm,为降水量的 20 多倍;年均气温 7.6℃,最高气温 39.1℃,最低-27℃,≥10℃的年积温为 3 088℃,无霜期 165 d;主风向为西北风,风沙活动集中在 3~5 月,年均风速 3.2 m·s⁻¹,>8 级大风日数年均均为 15 d;年日照时数为 3 045 h;冻土深度 1.0 m 左右。干旱高温和多风是其主要气候特点。地带性土壤为灰棕荒漠土。试验观测地土壤水分物理常数及土壤水分特征曲线见表 1。粮草间作地 0~60 cm 土层为灌溉风沙土,60~160 cm 土层为灌淤土,其它观测地 0~160 cm 土层均为灌溉风沙土。

表 1 试验区土壤水分物理常数及土壤水分特征曲线

Table 1 Soil moisture constants and soil moisture characteristic curves in study area				
土壤类型 Soil type	土壤容重 Soil volumetric weight(g·cm ⁻³)	田间持水量 Field moisture capacity(%)	饱和含水量 Saturation moisture content(%)	土壤水分特征曲线 Soil moisture characteristic curve
风沙土 Aeolian sandy soil	1.47	20.21	26.93	$S = -0.0654\theta^2 - 1.9863\theta + 30.3518$ $P < 0.0002$, $r^2 = 0.99$ 当 $\theta < 8$ $S = -0.0071\theta^2 - 0.0026\theta + 11.1562$ $P < 0.0002$, $r^2 = 0.99$ 当 $\theta \geq 8$
灌淤土 Anthropogenic-alluvial soil	1.45	21.38	28.45	$S = -0.0774\theta^2 + 0.3436\theta + 58.3197$ $P < 0.0002$, $r^2 = 0.98$ 当 $\theta < 26$ $S = 0.0371\theta^2 - 3.411\theta + 77.5333$ $P < 0.0002$, $r^2 = 0.98$ 当 $\theta \geq 26$

S:土壤吸力 Soil attraction(kPa); θ :体积含水率 Volumetric moisture content(%).下同 The same below.

2.2 研究方法

春季沙漠及农田风蚀深度用插杆标记观测,用集沙仪收集沙漠地表起沙和农田风蚀输沙量,带回实验室用 BS200 型电子天平称重,精度为 0.001 g,将沙样分不同高度用筛析法进行粒度分析。在输沙量中,粒径<0.063 mm 以下的粉尘可以形成浮尘^[20],有研究得出粒径<0.08 mm 的粉尘可以形成浮尘^[21],也有人认为沙尘暴的主要成分沙尘是粒径<0.1 mm 的微细颗粒^[19],本研究以粒径<0.063 mm 为标准计算粉尘量,包括粉沙和粘土,粉沙粒径为 0.063~0.0039 mm,粘土粒径<0.0039 mm;其它输沙量为 0.063~1.0 mm 之间的沙含量,包括粗沙、中沙、细沙和极细沙。

用地表粗糙度反映不同种植方式的抗风蚀能力。其大小与抗风蚀能力成正比,即风作用于地表,不同高度风速不同,愈近地面风速愈小,必有一高度风速为 0。此高度叫地表粗糙度。其测算方法是进行多点不同高度风速测定,用下式计算^[28],求其平均值:

$$\lg Z_0 = (\lg Z_2 - A \lg Z_1) / (1 - A)$$

式中, Z_1 、 Z_2 为不同观测高度(cm); $A = V_2 / V_1$,即不同高度风速比; Z_0 为地表粗糙度(cm)。

用 L520 中子土壤水分仪(江苏农业科学院原子能农业利用研究所生产)监测土壤水分动态,测定土层深度为:0~20、20~40、40~60、60~80、80~100、100~120、120~140、140~160 和 160~180 cm。每个土层在中间±5 cm 处读数,重复 3 次,由仪器按均值根据相应公式计算出体积含水率。

中子仪测定含水率为体积含水率,换算成以 mm 为单位的土壤含水量的公式为:

$$W = \theta h / 10$$

式中, W 为以 mm 为单位的含水率; θ 为体积含水率(%); h 为土层厚度(cm)。

中子仪标定参考文献^[23],得到不同土壤类型的标定方程(表 2)。其中,小麦地 0~160 cm 土层和粮草间作地 0~60

cm 土层均为灌溉风沙土;粮草间作地 60~160 cm 土层为灌淤土。灌溉风沙土风干土重量含水量为 0.5%~0.65%,土壤水吸力为 28.7 kPa;灌淤土风干土重量含水量为 1.3%~1.45%,土壤水吸力为 58.7 kPa。

表 2 绿洲不同土壤中子仪监测水分标定方程

Table 2 Calibration equation for soil moisture monitoring by neutron probe in different oasis soils

土地利用类型 Land use pattern	土壤深度 Soil depth(cm)	方程 Linear equation
小麦地 Wheat field	0~20 >20	$\theta = 156.8862n - 28.1715$ $P < 0.0005$, $r^2 = 0.99$ $\theta = 93.3181n - 16.8693$ $P < 0.0002$, $r^2 = 0.9957$
粮草间作地 Crop-grass intercropping	0~20 20~60	$\theta = 129.4072n - 20.7208$ $P < 0.003$, $r^2 = 0.9656$ $\theta = 101.5986n - 18.8255$ $P < 0.002$, $r^2 = 0.9799$
field	60~160	$\theta = 103.2439n - 20.978$ $P < 0.0006$, $r^2 = 0.9876$

$n = R/R_w$, R :中子管实际读数 Data of neutron probe reading in soil; R_w :参照读数 Data of reference reading.

3 结果与分析

3.1 不同种植方式防止春季就地起沙的效果

春季农田风沙危害严重,大风导致土壤风蚀,就地起沙(表 3)。由表 3 可以看出,春耕裸露农田、稀疏灌木林地和流动沙漠都有风沙流产生,尽管沙漠含粉尘比率最低,但由于其形成强风沙流,输沙量显著大于其它农业种植方式,导致产生的粉尘量最多;其次是春耕裸露农田,边缘春耕裸露农田输沙量要高出绿洲内部 70.6%,绿洲内部春耕裸露农田输沙量相当于绿洲边缘稀疏灌木林地(盖度 10%~15%)。其它农业种植方式的粉尘含量都在 60%以上,但由于土壤风蚀轻,粉尘含量的绝对值小,对浮尘和沙尘暴的贡献率小。贡献率最小的是净作苜蓿地,其次是粮草间作苜蓿带(作物带和苜蓿带等宽,宽度为 3 m)。另外,早春地膜覆盖种植能显著防止土壤风蚀。

表 3 沙漠及绿洲农业不同种植方式春季输沙量和粉尘量*
Table 3 Spring sand transport rate and dust content in relation to different use and cultivation ways in oasis agricultural area and desert

土地利用方式 Land use and cultivation way	输沙量 Sand transport rate (g·min ⁻¹ ·cm ⁻²)	地表粗糙度 Roughness length (cm)	粉尘量 Suspended dust content rate (g·min ⁻¹ ·cm ⁻²)	粉尘占输沙量 Ratio of dust content to sand transport (%)
绿洲外围流动沙漠 Bare floating desert around oasis	1.25	0	0.192	15.4
绿洲边缘稀疏灌木林地 Sparse shrub forest at the edge of oasis	0.17	0.01	0.028	16.5
绿洲边缘春耕裸露农田 Spring-plowed bare cropland at the edge of oasis	0.29	0.01	0.083	28.7
绿洲内部春耕裸露农田 Spring-plowed bare cropland inside oasis	0.17	0.04	0.051	30.5
净作小麦田 Wheat field	1.8×10 ⁻³	1.04	1.24×10 ⁻³	68.9
地膜覆盖种植行间 Plastic film-covered planted row middle	1.6×10 ⁻³	0.01	1.06×10 ⁻³	66.3
冬灌免耕农田 Winter irrigated zero tillage cropland	1.8×10 ⁻³	0.86	1.23×10 ⁻³	68.3
粮草间作苜蓿带 Crop and grass interplanting with alfalfa	1.4×10 ⁻³	2.15	1.03×10 ⁻³	72.1
粮草间作裸露作物带 Crop and grass interplanting with bare belt	3.5×10 ⁻³	0.95	2.15×10 ⁻³	61.4
净作苜蓿地 Alfalfa field	1.2×10 ⁻³	5.25	0.92×10 ⁻³	80.7

* 4月下旬测定,测定时地面上2 m高处风速为8.5~9.0 m·s⁻¹;输沙量为0~20 cm平均值 Measured in late April wind velocity at the height of 2 m above the surface is 8.5~9.0 m·s⁻¹; sand transport rate is the mean value in 0~20 cm height. 净作小麦田小麦高5 cm,粮草间作地苜蓿高4 cm,净作苜蓿高8 cm Wheat height in single seeding field is 5 cm, alfalfa height in grain-grass intercropping field is 4 cm, and alfalfa height in single seeding field is 8 cm.

用插杆标记多点观测(沙漠及黑河两岸沙丘6个点、农田8个点)得出,每年河西走廊中段沙漠风季(3~5月)风蚀深度为5~7 mm,绿洲春耕农田土壤风蚀深度为4~5 mm.

由图1可见,春耕农田的输沙量在6 cm以下显著大于稀疏灌木地,在6 cm以上的高度二者没有显著差异.沙漠输沙量(y)与高度(x)的关系式为: $y = 4.0628e^{-0.1596x}$, $R^2 = 0.9827$;稀疏灌木地为: $y = 0.6612e^{-0.1832x}$, $R^2 = 0.997$;春耕农田为: $y = 1.2862e^{-0.2744x}$, $R^2 = 0.9508$.

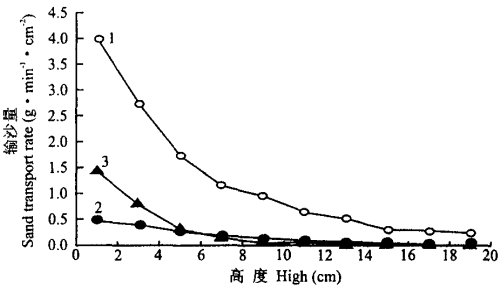


图 1 沙漠及绿洲不同类型输沙量随高度的变化
Fig.1 Changes of sand transport rate with height in desert and oasis.
1)沙漠 Desert;2)稀疏灌木地 Sparse shrub forest;3)春耕农田 Spring-plowed bare cropland at the edge of oasis.

3.2 不同种植方式对风速梯度的影响

由图2可见,苜蓿地的风速廓线与一般规律一致,上面风速随高度增加按指数增长;苜蓿层风速随深度的增加而减小并趋于零.小麦地由于小麦高度小趋势不明显,但风速随高度的变化,2 m以下不同植被类型的风速梯度变化较大,2 m以上变化较小.

3.3 不同种植方式对土壤贮水的影响

水分是沙地环境中的主导因子.用于观测的所有农田都在前一年11月初进行了等量(1 650 m³·hm⁻²)冬灌,4月中旬测定以前再未灌溉,不同方式

春季0~100 cm土层内的蓄水量见图3(4月中旬测定).方差分析得出 $F = 13.96 > F_{0.01} = 5.99$ 之间存在极显著差异 ($P < 0.01$),早春覆膜地和苜蓿地的蓄水量显著高于春耕裸露地和春小麦地.粮草间作作物带不同管理方式土壤水分变化较大(图4),春季提早覆膜可以有效地保持水分,早春覆膜地比春耕地0~100 cm土层要多蓄水31.9 mm,蓄水量增加35.6%.

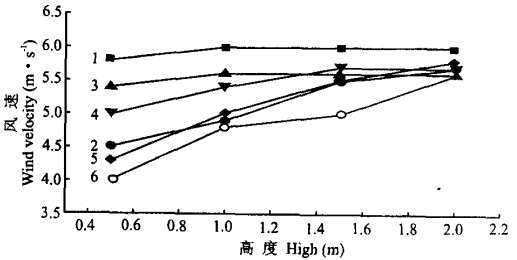


图 2 不同种植方式的风速梯度
Fig.2 Wind velocity gradients for different cultivation ways.
1)沙漠 Desert;2)稀疏灌木地 Sparse shrub forest;3)春耕玉米地 Spring-sowed corn field;4)免耕留茬棉花地 Zero tillage leaved cotton stalks field;5)小麦地(小麦高22 cm)Wheat field(wheat height was 22 cm);6)苜蓿地(苜蓿高34 cm)Alfalfa field(alfalfa height was 34 cm).

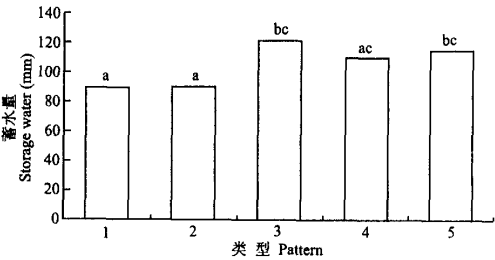


图 3 不同种植方式春季0~100 cm土层蓄水量比较
Fig.3 Comparison of spring moisture storages in 0~100 cm soil layer for different cultivation ways.
1)春耕裸露农田 Spring-plowed bare cropland at the edge of oasis;2)春小麦地 Wheat field;3)早春覆膜地 In early Spring plastic film-covered cropland;4)免耕地 Zero tillage cropland;5)苜蓿地 Alfalfa field.

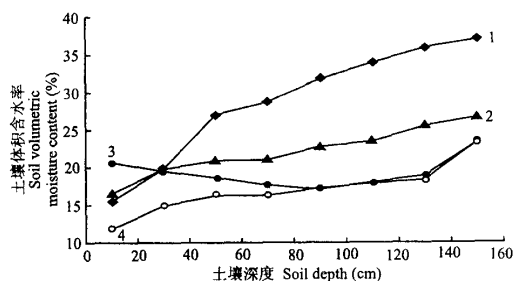


图4 粮草间作地春季土壤水分变化

Fig. 4 Spring soil moisture change in grain crop-grass intercropping field.

1) 苜蓿带(苜蓿高3 cm) Alfalfa belt (alfalfa height was 3 cm); 2) 免耕作物带 Zero tillage crop-belt; 3) 覆膜作物带(秋季翻耕,测定前15 d 覆盖地膜) Plastic film-covered crop-belt (ploughed in autumn and the film was covered 15 days before the determination); 4) 秋耕作物带 In autumn plowed crop-belt.

4 讨 论

据中国气象局沙尘暴监测显示,我国北方地区大规模沙尘暴路径有3区。Ⅰ区:以河西走廊、内蒙古西部干旱区和宁夏干旱、半干旱区为最多,影响范围也最广;Ⅱ区:新疆盆地干旱区。由于新疆盆地大多为无人区,加之受青藏高原的阻挡,造成的危害相对较小,直接影响范围基本限于甘肃酒泉以西和塔克拉玛干周边地区;Ⅲ区:内蒙古中部到河北西北部半干旱地区。裸露地表富有松散、干燥的沙尘是沙尘暴形成的物质基础;不稳定的空气层结和足够强劲持久的风力是沙尘暴形成的必要气象动力和热力条件。沙尘暴一方面影响源区环境,另一方面通过长距离传输对远离其源区的地方产生影响^[18,29],如春季太平洋北部沙尘气溶胶成分主要来源于亚洲沙尘暴^[9,12,24]。我国沙尘暴多发生在3~5月。此期间荒漠植被还未萌发,绿洲农田地表裸露或为幼苗期,丰富的活动沙面为扬沙和沙尘暴提供了物质条件。在大风袭击下,土壤颗粒的移动有滚动、跃移和悬浮3种类型。滚动沙粒直径在0.5~1.0 mm之间。这种移动方式使沙粒在当地沉积,淹埋植物;跃移沙粒的直径通常是0.1~0.5 mm,跃移颗粒经常伤害植物,是造成植物损害的主要因素;由于跃移和直接风力作用,直径小于0.1 mm的土壤颗粒被大风刮起,悬浮到空中随风输送,即悬浮。刮到大气中的悬浮颗粒的数量一般由土壤表面微粒的多少来决定,而不单受风能大小制约^[11]。粉尘($d < 63 \mu\text{m}$)随风高空输移速度快、覆盖面广,污染环境,危害人体健康。要减少城市沙尘暴、浮尘天气,首先应从治理粉尘开始。河西地区为我国沙尘多发区之一^[26],河西走廊中部

黑河中游两岸有10余条沙丘带和与之交错分布的风蚀地带^[17],总面积超过700 km²,年风蚀深度为5~7 mm,按表3的测定结果(相当于10 m高处7级风力等级),沙漠粉尘含量为15.4%,黑河中游两岸年产生的粉尘量达 $7.9 \sim 11.1 \times 10^5 \text{ t}$ 。在同一风速下,挟沙气流(风沙流)与不挟沙气流(净风)作用于同一粉沙质壤土或固定风沙土引起的风蚀量差别极为明显^[5],对黑河中游的农业生产危害最大。河西地区有沙漠(沙丘及沙地) $1.87 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[15],年产粉尘量约 $2.55 \times 10^7 \text{ t}$,黑河流域沙漠3560 km²,年产粉尘量在 $4.8 \times 10^6 \text{ t}$ 左右。黑河中、上游有耕地面积2775 km²,河西地区有耕地面积8951 km²^[15]。目前,这些农田基本采用春耕播种方式,年土壤风蚀深度达4~5 mm,粉尘含量平均为29.6%(表3)。黑河流域农田耕地每年产生的粉尘量达 $4.8 \sim 6.0 \times 10^6 \text{ t}$,河西地区农田耕地年产粉尘量达 $15.6 \sim 19.5 \times 10^6 \text{ t}$ 。这些细小粒子是土壤中最肥沃的部分。春耕播种的农田对沙尘暴的贡献非常大,黑河流域农田耕地土壤风蚀产生的粉尘随风高空输移的量高于沙漠输移量。河西地区农田耕地面积为沙漠面积的47.7%,但平均输移粉尘量为沙漠的68.8%,1 hm²的春耕农田产生的粉尘量相当于1.5 hm²沙漠产生的粉尘量。

地表粗糙度是反映地表抗风蚀能力的重要指标。在盖度相同条件下,均匀分布较丛状分布可产生较大的粗糙度^[7]。植物作为地理环境的重要组成部分,是影响土壤风蚀最活跃的因素之一。在风速 $12.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 条件下,当植被盖度>60%时,为轻微风蚀或无风蚀,60%~20%为中度风蚀,<20%为强烈风蚀^[7]。农作物的种植制度、收获方法等形成的农业生产方式,直接影响着农业生产环境,覆盖作物可以减少土壤损失,增加土壤养分^[16,21]。地表结构破损与地表修复是农业生产的基本过程,其目的是将地表结构破损降低到最低水平,而又不降低农业生产力,并将这种破损的时间控制在有利于环境的维护上。耕作降低了土壤的抗风蚀能力,正确、有效的农艺措施可以减小地表破损率,避开风季。保护性耕作措施,如少耕、免耕和深松处理能够保持地表结构,增加土壤蓄水,提高产量^[27]。春季解冻后地表土层疏松,采用早春农田覆膜技术,可显著降低土壤风蚀(表3),提高土壤含水率(图3、图4)。美国根据地面秸秆残茬覆盖程度,把土壤耕作分为传统耕作、少耕和免耕或保护性耕作^[19]。考虑到机械耕作方便,绿洲粮草间作作物带以间作带宽的2/3为宜,作物

带实行免耕播种或秋季翻耕早春覆膜播种。

有效的种植方式具有保持土壤水分的效能(图3、图4)。目前,河西绿洲农业朝着设施精准农业和大田生态农业两个方向发展。冬灌是绿洲农业生产的重要一环,灌水定额一般为 $1\,500\sim 1\,650\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$,以防止土壤盐渍化,提高土壤湿度,减少春季土壤风蚀量。地膜覆盖可以通过防止土壤蒸发和提升土壤深层水分至作物可利用层来增加土壤中有效含水量^[25]。早春覆膜地比春耕裸露地 $0\sim 100\text{ cm}$ 土层要多蓄水 31.9 mm ,是目前传统春耕播种方式下将冬灌水分尽可能多地保持在田里的一种有效措施,是提高水分利用率、防止土壤风蚀的有利措施(表3)。

甘肃河西走廊中段沙漠目前年风蚀深度达 $5\sim 7\text{ mm}$,粉尘含量($d<63\text{ }\mu\text{m}$)占输沙量的 15.4% ;绿洲春耕农田土壤年风蚀深度达 $4\sim 5\text{ mm}$,粉尘含量为 29.6% 。在目前农业耕作制度下,绿洲农田面积比例越大,产生沙尘暴、浮尘的粉尘输移量就越多,对其它区域环境的危害就越大。应调整农业产业结构和种植结构,走粮食自给、产业创汇的路子,大力发展粮食-经济-饲料作物三元结构。改变现有耕作制度,实行作物留茬收割,冬灌免耕,春季用免耕施肥播种机直接播种,夏季进行深松、耙地。改外围绿洲农田净作为粮草间作,对裸露农田实行春季提早覆膜播种技术,减少地表裸露,以有效地保持良好土壤水分,降低农田土壤风蚀,减少粉尘输移量。

参考文献

- Argabright SM. 1991. Evolution in use and development of the wind erosion equation. *J Soil Water Cons*, **46**(2): 104~105
- Bagnold RA. 1941. *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. New York: William Morrow and Company. 6~8
- Chen J(陈杰), Yang J-P(杨京平), Wang Z-Q(王兆寿). 2001. Dynamic simulation on growth and development of spring corn in different cropping patterns in northern Zhejiang Province. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **12**(6): 859~863 (in Chinese)
- Dong G-R(董光荣), Li C-Z(李长治), Jin J(金炯), et al. 1987. Some wind tunnel experiment results on soil erosion by wind. *Chin Sci Bull* (科学通报), **32**(4): 297~301 (in Chinese)
- Dong G-R(董光荣). 2002. *Chinese Desert Forming and Evolving, Climatic Change and Desertification*. Beijing: Ocean Press. 416~421 (in Chinese)
- Dong Z-B(董治宝), Chen W-N(陈渭南), Dong G-R(董光荣), et al. 1995. Quantitative relationship between soil erosion by wind and surface structure destruction. *Chin Sci Bull* (科学通报), **40**(1): 54~57 (in Chinese)
- Dong Z-B(董治宝), Chen W-N(陈渭南), Dong G-R(董光荣), et al. 1996. Influences of vegetation cover on the wind erosion of sandy soil. *Acta Sci Circ* (环境科学学报), **16**(4): 437~443 (in Chinese)
- Dong Z-B(董治宝), Chen W-N(陈渭南), Li Z-S(李振山), et al. 1997. Study on wind erosion of aeolian sand soil under reclamation. *Acta Pedol Sin* (土壤学报), **34**(1): 74~80 (in Chinese)
- Duce RA, Unni CK, Ray BJ, et al. 1980. Long range atmospheric transport of soil dust from Asia to the tropical North Pacific: Temporal variability. *Science*, **209**: 1522~1524
- Fryrear DW, Krammes CA, Williamson DL, et al. 1994. Computing the wind erodible fraction of soil. *J Soil Water Cons*, **49**(2): 183~188
- Fryrear DW. 1986. A field dust sampler. *J Soil Water Cons*, **41**: 117~120
- Gao Y, Arimoto R, Zhou MY, et al. 1992. Relationship between the dust concentrations over Eastern Asia and the remote North Pacific. *J Geophys Res*, **97**: 9867~9872
- George RF. 1991. Advances in wind and water erosion prediction. *J Soil Water Cons*, **46**(1): 27~29
- Hai C-X(海春兴), Liu B-Y(刘宝元), Zhao Y(赵烨). 2002. Influence of soil humidity and vegetation coverage on wind erosion. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **13**(8): 1057~1058 (in Chinese)
- Li F-X(李福兴), Yao J-H(姚建华). 1998. *Integrated Research of Economic Development and Environment Renovating in Hexi Corridor Regions*. Beijing: China Environment Science Press. 39~48 (in Chinese)
- Liu X-B(刘晓冰), Song C-Y(宋春雨), Herbert SJ, et al. 2002. Ecological effects of cover crops. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **13**(3): 365~368 (in Chinese)
- Liu X-M(刘新民), Wang Z-X(王振先), Tang Z-Z(唐宗泽), et al. 1987. Integrated transformation of desertification land in the peripheral districts of oases. *J Arid Land Res Environ* (干旱区资源与环境), **1**(1): 98~105 (in Chinese)
- Liu Y(刘毅), Zhou M-Y(周明耀). 1999. The internal variation of mineral aerosols in the surface air over Beijing and the East China Sea. *Acta Sci Circ* (环境科学学报), **19**(6): 642~647 (in Chinese)
- Lu M(路明). 2002. Formation causes and control of sandstorm in China. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), **35**(4): 440~446 (in Chinese)
- Pye K, Tsaoar H. 1990. *Aeolian Sand and Sand Dunes*. London: Academic Division of Unwin Hyman Limited. 45~47
- Reicosky OC, Forcella F. 1998. Cover crop and soil quality interactions in agroecosystems. *J Soil Water Cons*, **53**(3): 224~229
- Su P-X(苏培玺), Du M-W(杜明武), Zhao A-F(赵爱芬), et al. 2002. Study on water requirement law of some crops and different planting mode in oasis. *Agric Res Arid Area* (干旱地区农业研究), **20**(2): 79~85 (in Chinese)
- Su P-X(苏培玺). 2000. Research on soil dynamic constants of sandy land. *J Des Res* (中国沙漠), **20**(3): 329~332 (in Chinese)
- Uematsu M, Duce RA, Prospero JM, et al. 1983. Transport of mineral aerosol from Asia over the North Pacific Ocean. *J Geophys Res*, **88**: 5343~5352
- Wang J(王俊), Li F-M(李凤民), Song Q-H(宋秋华), et al. 2003. Effects of plastic film mulching on soil temperature and moisture and on yield formation of spring wheat. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **14**(2): 205~210 (in Chinese)
- Wang S-G(王式功), Wang J-Y(王金艳), Zhou Z-J(周自江), et al. 2003. Regional characteristics of dust events in China. *Acta Geogr Sin* (地理学报), **58**(2): 193~200 (in Chinese)
- Wang X-B(王小彬), Cai D-X(蔡典雄), Jin K(金轲), et al. 2003. Water availability for winter wheat affected by summer fallow tillage practices in sloping dryland. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), **36**(9): 1044~1049 (in Chinese)
- Wu Z(吴正). 1987. *Aeolian Sand Geomorphology*. Beijing: Science Press. 24~26, 279~281 (in Chinese)
- Zhang D-Z(张代洲), Zhao C-S(赵春生), Qin Y(秦瑜). 1998. Composition and morphology analyses of dust particles. *Acta Sci Circ* (环境科学学报), **18**(5): 449~456 (in Chinese)
- Zhang L-F(张立峰), Bian X-J(边秀举), Fan B-X(樊秉戌). 1997. Water use efficiency of reduced tillage with "strip-loosing and stub-sowing" and "water-nutrient collecting". *Agric Res Arid Area* (干旱地区农业研究), **15**(3): 33~36 (in Chinese)
- Zobeck TM. 1991. Soil properties affecting wind erosion. *J Soil Water Cons*, **46**(2): 112~118

作者简介 苏培玺,男,1964年生,博士,研究员,主要从事绿洲农业与荒漠植物生态的研究,发表论文30余篇。Tel: 0931-4967211; E-mail: supx@ns.lzb.ac.cn