

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.03.031

张艳霞, 陈智坤, 胡文友, 等. 陕西省设施农业土壤退化现状分析. 土壤, 2020, 52(3): 641–645.

## 陕西省设施农业土壤退化现状分析<sup>①</sup>

张艳霞<sup>1,2</sup>, 陈智坤<sup>1</sup>, 胡文友<sup>2</sup>, 孙晓宇<sup>3</sup>, 黄标<sup>2\*</sup>, 田康<sup>2</sup>

(1 陕西省科学院土壤资源与生物技术应用重点实验室, 陕西省西安植物园(陕西省植物研究所), 西安 710061; 2 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(南京土壤研究所), 南京 210008; 3 陕西省微生物研究所, 西安 710043)

**摘要:** 本文以陕西省为例, 分别对陕北、关中、陕南 148 个重点设施蔬菜基地进行了大棚种植历史、轮作现状、水肥管理、病虫害现状等系统调查, 并通过土壤样品采集, 分析了土壤基本性质、养分含量和重金属含量。结果显示, 陕西省 3 个地区的设施土壤 pH 均显著低于周边大田土壤, 且随着设施种植年限增加土壤 pH 呈现持续下降趋势; 土壤次生盐渍化特征明显( $EC > 500 \mu S/cm$ ); 土壤养分积累现象普遍, 特别是速效养分积累显著; 陕北、关中地区设施土壤部分重金属累积超过大田土壤, 表明该地区设施土壤退化现象明显。结合设施农业调查资料发现, 设施土壤退化的根本原因是利用强度高、农用品投入过大, 这将对设施生产与生态环境造成影响, 因此, 在该地区, 开展设施土壤轮作休耕或修复工作非常必要。

**关键词:** 土壤退化; 养分失衡; 设施农业; 土壤修复

中图分类号: X53 文献标志码: A

### Soil Degradation in Greenhouse Vegetable Production Systems in Shaanxi

ZHANG Yanxia<sup>1,2</sup>, CHEN Zhikun<sup>1</sup>, HU Wenyu<sup>2</sup>, SUN Xiaoyu<sup>3</sup>, HUANG Biao<sup>2\*</sup>, TIAN Kang<sup>2</sup>

(1 Key Laboratory of Soil Resource & Biotech Applications, Shaanxi Academy of Sciences, Xi'an Botanical Garden of Shaanxi Province, Institute of Botany of Shaanxi Province, Xi'an 710061, China; 2 Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3 Microbiology Institute of Botany of Shaanxi Province, Xi'an 710043, China)

**Abstract:** The objective of this paper is to investigate the status of plastic greenhouse (PG) soil degradation in Shaanxi Province. 148 PGs in Shaanxi were chosen to conduct the questionnaire surveys on production and management. A total of 330 soil samples in PGs and open fields were collected, and soil pH, soil organic matter (SOM), electrical conductivity (EC), cation exchange capacity (CEC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), total potassium (TK), bioavailable phosphorus (AvP), bioavailable potassium (AvK) and heavy metals were analyzed. Results showed that the mean value of pH in PG soil was lower than the level in open field soil, and PG soil planted over 10 years had the lowest pH. The mean value of EC in PG soil was much higher than the level in open field soil. The ratios of N: P: K and AvP: AvK in PG soil were respectively higher than those levels in open field soil, showing nutrient imbalance of PG soil. Heavy metals accumulation was more serious in PG soil than in open field soil in northern Shaanxi and the middle of Shaanxi, especially Cd, Cu, and Zn. In conclusion, PG soil degradation is serious in Shaanxi Province. PG soil degradation is closely related to highly intensive agricultural input and yearly continuous cropping, thus, it is very urgent to adopt crop rotation and fallow systems to improve PG soil quality.

**Key words:** Soil degradation; Nutrient imbalance; Facility agriculture; Soil remediation

设施农业高强度的利用方式对土壤生产功能、污染物行为等影响突出, 导致土壤退化, 如酸化<sup>[1]</sup>、次生盐渍化<sup>[2-3]</sup>、养分失衡<sup>[4]</sup>、污染物积累和有效性提高<sup>[4-6]</sup>等, 产生连作障碍; 同时, 一些大田生产条件

下易分解的农药<sup>[7-8]</sup>、酰胺酯<sup>[9-10]</sup>和抗生素<sup>[11-12]</sup>等也会在土壤中积累, 积累量可达大田土壤的数倍, 严重影响设施农业生产发展和农产品质量安全<sup>[13]</sup>。陕西省作为我国西北地区主要的设施蔬菜生产基地之一, 近

①基金项目: 陕西省科学院重大研究专项(2016K-07)、陕西省重点研发专项重点项目(2017ZDXM-NY-049)、国家科技基础性工作专项(2015FY110400-(2))和国家青年科学基金项目(41807497)资助。

\* 通讯作者(bhuang@issas.ac.cn)

作者简介: 张艳霞(1984—), 女, 山西长治人, 博士后, 主要从事环境管理与土壤污染物暴露风险等相关研究。E-mail: yxzhang@issas.ac.cn

年来,在省委、省政府对设施农业的政策扶持下,设施蔬菜总面积已从 2008 年的不足 1.3 万  $\text{hm}^2$  增至 2014 年的 6.7 万  $\text{hm}^2$ <sup>[14]</sup>,设施蔬菜总产量占全省蔬菜总产量的 35.6%<sup>[15]</sup>。全省设施蔬菜每公顷净收入达到 15.8 万元<sup>[16]</sup>,设施农业已成为陕西省农民增收的主导产业。然而,随之带来的设施土壤质量恶化问题也不断出现,这已成为制约陕西省设施农业可持续发展的主要矛盾。因此,本研究通过调查全省重点设施农业基地与土壤样品分析,剖析陕西省设施农业土壤退化现状特征,为下一步开展设施农业土壤轮作休耕和修复工作提供数据支撑,为当地或类似地区决策部门发展设施农业产业提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区域

陕西省是我国西部地区主要的蔬菜生产基地之一,设施面积约占西部设施总面积的 15%<sup>[14]</sup>。秦岭横贯境内,陕北、关中、陕南的区域空间差异显著,主要表现为:陕南处于秦岭以南,为北亚热带大陆性湿润季风气候;植被覆盖率高,土壤黏粒较多、pH 呈弱酸性、有机质含量高;多为山区,交通不便;温室类型以塑料大棚为主,全年蔬菜生产不停歇。关中处于秦岭以北,为暖温带半湿润大陆性季风型气候,地势平坦,是陕西主要粮食产区,土层较厚、土壤 pH 呈中偏弱碱性、有机质含量较高;塑料大棚与日光温室比重相当,基本实现全年生产。陕北北接内蒙,为温带大陆性半干旱气候;榆林多为沙土地、延安多为黄土地,植被覆盖少,土壤 pH 呈中性偏碱性、有机质含量偏低;以日光温室为主,夏季一般停歇,秋冬季进行蔬菜生产。

### 1.2 调查及样品采集与处理

设施蔬菜生产基地土壤调查与采样开展于 2016 年。通过对全省各县规模以上设施农业示范园筛选,最终确定 148 家(其中,陕北 47 家,关中 88 家,陕南 14 家)设施蔬菜基地开展研究,涵盖全省 10 个地级市。陕北以日光温室为主,陕南以塑料大棚为主,关中地区两种设施类型均普遍(图 1)。调查内容主要包括设施蔬菜大棚的种植历史、种植年限、农膜使用、肥料使用、灌溉历史、农药使用、病虫害情况等。

在这些设施蔬菜基地,共采集设施土壤样品 200 份,对照农田土壤样品 130 份,样点采用 GPS 定位。在每一个设施蔬菜基地的棚内采用“之”字型采样法<sup>[17]</sup>,采集 5 个表层土壤(0~20 cm),混合均匀后取约 1 kg 装入自封袋形成一个土壤样品,对照样

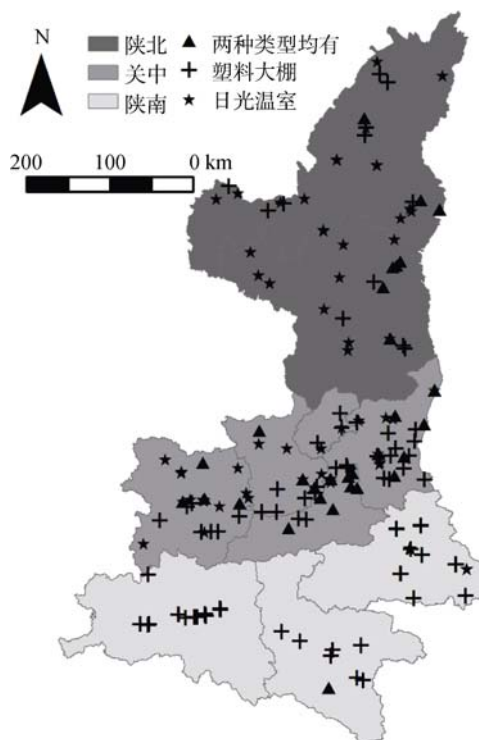


图 1 陕西省设施蔬菜基地设施大棚类型及采集点位

品取自大棚外无大棚种植历史的农田,包括小麦地、油菜地、稻田等,同样为 5 个点的混合样品。野外采集的土壤样品经风干后,剔除石块、植物根茎等杂质,研磨分别过 10 目筛用于土壤 pH、电导率(EC)、有效磷(AvP)、速效钾(AvK)测定;过 60 目筛用于阳离子交换量(CEC)、有机质(SOM)、全氮(TN)的测定;过 100 目筛用于 Cd、As、Hg 测定;过 200 目筛待全磷(TP)、全钾(TK)、Cr、Cu、Pb、Zn 等全量测定。

### 1.3 样品分析

土壤 pH 采用水土比 2.5:1 混匀,并用 PHS-3C 型酸度计进行测定;EC 采用电导率仪(DDS-307)进行测定,水土比 5:1;AvP 采用  $\text{NaHCO}_3$  提取,钼锑抗比色,分光光度计测定;AvK 测定采用  $\text{NH}_4\text{OAc}$  提取,火焰光度计(FP650)分析;CEC 测定采用  $\text{NH}_4\text{OAc-EDTA}$  (1 mol/L:0.005 mol/L)提取,定氮仪(DDS-307)蒸馏方法测定;SOM 采用外加热重铬酸钾氧化容量法测定;TN 采用浓  $\text{H}_2\text{SO}_4$  消化,凯氏定氮法测定。以上测试方法详见《土壤农业化学分析方法》<sup>[17]</sup>一书。土壤 Cd 采用盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸消解,电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)测定<sup>[18]</sup>,As、Hg 采用王水消解,原子荧光光谱法(AFS)测定<sup>[19]</sup>。TP、TK、Cr、Cu、Pb、Zn 等含量测定采用 200 目土壤通过压片,X 射线荧光光谱仪(PW2440X)测定<sup>[20]</sup>。

## 2 结果

### 2.1 设施农业土壤酸化及次生盐渍化特征

设施土壤酸化、盐化现象明显, 陕南、关中、陕北 3 个地区设施农业土壤 pH 均低于对应区域的大田土壤, 其中陕北、关中地区差异均达到  $P < 0.01$  显著水平(表 1)。尽管陕南地区设施农业土壤 pH 较大田土壤差异没有达到显著水平, 但其设施土壤的 pH 降幅最大(平均下降 0.69 个 pH 单位), 其次是陕北(0.52)、关中(0.25)。陕北设施蔬菜种植年限在 10 a 以上的土壤 pH 显著高于种植年限在 5~9 a 的设施土壤; 而关中和陕南地区则、种植年限 10 a 以上土壤 pH 低于种植 5~9 a 土壤, 差异不显著(表 2)。陕北、关中、陕南设施土壤 EC 值显著高于大田土壤, 设施土壤 50% 以上的点位 EC 值超过 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , 铜川、安康等部分点位 EC 值超过 1 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , 说明设施大棚土壤已经发生次生盐渍化。由于不同地区、不同种植年限

设施蔬菜土壤样本间 EC 的变异系数均较大, 不同地区、不同种植年限间土壤 EC 差异并不显著。

### 2.2 设施土壤主要养分累积状况

设施土壤养分累积现象普遍, 特别是土壤速效养分。与普通大田相比, 设施土壤 TN 和 TP 显著增加。与全国统一分级标准相比, 陕北设施土壤 TN 处于 4 级, 中等水平(0.75~1.0 g/kg); 而陕南和关中地区设施土壤处于第 3 等级, 高水平(1.0~1.5 g/kg)。设施土壤 TP 积累更加明显, 3 个区域设施土壤 TP 均处于第 1 等级, 极高水平(>1.0 g/kg)。虽然普通大田土壤和设施土壤 AvP 都处于极高水平(>40 mg/kg), 陕北、关中和陕南地区设施土壤 AvP 含量分别是对应大田土壤的 2.92 倍、3.22 倍和 2.61 倍。3 个区域设施土壤 AvK 含量都处于极高水平(>200 mg/kg), 设施大棚 AvP:AvK 比例明显高于大田(表 3), 说明设施土壤中有效磷和速效钾的积累量不同。

表 1 设施大棚与大田土壤 pH、CEC、EC、SOM 的比较

土壤来源	pH			EC ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )			CEC (mmol/kg)			SOM (g/kg)		
	陕北	关中	陕南	陕北	关中	陕南	陕北	关中	陕南	陕北	关中	陕南
大田	8.72 A	8.19 A	6.86 a	127.55 B	177.17 B	143.07 B	63.39 a	175.19 a	165.45 a	6.2 B	12.8 b	15.2 b
大棚	8.20 B	7.94 B	6.17 a	482.95 A	548.80 A	669.77 A	70.57 a	174.18 a	174.17 a	10.6 A	16.9 a	19.2 a

注: 表中同列数据不同的小写和大写字母分别表示大田和大棚土壤间差异达  $P < 0.05$  和  $P < 0.01$  显著水平。

表 2 种植年限对设施大棚土壤 pH、CEC、EC、SOM 的影响

地区	种植年限(a)	样本量	pH	EC ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	SOM(g/kg)	CEC (mmol/kg)
陕北	>10	27	8.33 $\pm$ 0.52 a	390.77 $\pm$ 306.40 b	7.9 $\pm$ 4.2 B	65.25 $\pm$ 24.34 b
	1~4	17	8.14 $\pm$ 0.62 ab	443.74 $\pm$ 593.53 ab	9.7 $\pm$ 5.2 B	63.56 $\pm$ 31.50 b
	5~9	11	7.81 $\pm$ 0.57 b	845.50 $\pm$ 598.74 a	15.9 $\pm$ 7.8 A	86.57 $\pm$ 22.98 a
关中	>10	50	7.89 $\pm$ 0.60 a	547.75 $\pm$ 585.05 a	15.8 $\pm$ 8.7 a	183.96 $\pm$ 58.87 a
	1~4	23	8.00 $\pm$ 0.61 a	557.36 $\pm$ 668.57 a	18.1 $\pm$ 8.7 a	147.92 $\pm$ 40.08 a
	5~9	18	7.91 $\pm$ 0.44 a	524.86 $\pm$ 417.10 a	16.2 $\pm$ 5.8 a	171.83 $\pm$ 60.36 a
陕南	>10	11	5.91 $\pm$ 1.06 a	776.55 $\pm$ 669.00 a	16.1 $\pm$ 3.3 a	158.64 $\pm$ 56.02 a
	1~4	21	6.94 $\pm$ 0.82 a	517.19 $\pm$ 504.64 a	18.4 $\pm$ 11.0 a	185.44 $\pm$ 82.08 a
	5~9	6	6.41 $\pm$ 1.12 a	438.48 $\pm$ 211.37 a	15.1 $\pm$ 4.3 a	136.08 $\pm$ 62.39 a

注: 同列数据小写字母和大写字母不同分别表示同一地区不同种植年限土壤间差异  $P < 0.05$  和  $P < 0.01$  显著水平。

表 3 设施大棚与大田土壤 N、P、K、AvK 和 AvP 含量

指标	陕北		关中		陕南	
	大田	大棚	大田	大棚	大田	大棚
样本量	42	56	75	93	24	51
TN (g/kg)	0.44 $\pm$ 0.27 B	0.76 $\pm$ 0.53 A	0.93 $\pm$ 0.54 B	1.24 $\pm$ 0.71 A	0.98 $\pm$ 0.42 B	1.48 $\pm$ 0.81 A
TP (g/kg)	0.77 $\pm$ 0.32 B	1.11 $\pm$ 0.51 A	1.09 $\pm$ 0.52 B	1.52 $\pm$ 0.76 A	1.10 $\pm$ 0.39 B	1.58 $\pm$ 0.80 A
TK (g/kg)	17.62 $\pm$ 1.31 a	17.56 $\pm$ 1.09 a	19.32 $\pm$ 1.09 a	19.55 $\pm$ 1.53 a	19.26 $\pm$ 2.37 b	20.65 $\pm$ 2.39 a
N:P:K	2.5:4.4:100	4.3:6.3:100	5.3:6.2:100	7.0:8.6:100	5.6:6.2:100	8.4:9.0:100
AvP (mg/kg)	41.85 $\pm$ 64.23 B	122.16 $\pm$ 107.78 A	44.40 $\pm$ 76.54 B	142.94 $\pm$ 112.36 A	59.79 $\pm$ 62.19 B	156.33 $\pm$ 98.22 A
AvK (mg/kg)	185.05 $\pm$ 104.04 B	273.66 $\pm$ 183.76 A	277.76 $\pm$ 281.14 B	422.65 $\pm$ 54.88 A	151.83 $\pm$ 65.37 B	303.61 $\pm$ 300.31 A
AvP:AvK	23:100	66:100	24:100	77:100	32:100	84:100

注: 同行数据小写字母和大写字母不同分别表示同一地区大田和大棚土壤间差异达  $P < 0.05$  和  $P < 0.01$  显著水平。

### 2.3 设施土壤重金属累积状况

本文主要考察了重金属在设施土壤中的累积情况。结果显示, 陕北、关中地区设施土壤 Cd、Cu、Zn 等累积量高于普通大田土壤, 陕南地区仅 Zn 在设施土壤中的累积高于大田(表 4)。与国家《温室蔬菜

产地环境质量评价标准》(2006)进行比较, 设施表层土壤 Cd、Zn 等累积已出现超标样点, 超标率在 0.5% ~ 7.2%, 在设施生产最强烈的关中地区较为突出。同时, 部分重金属(如 Cd 和 Zn)含量随种植年限的增加有增加趋势(图 2)。

表 4 设施大棚与大田间土壤重金属含量比较(mg/kg)

重金属	陕北		关中		陕南	
	大田	大棚	大田	大棚	大田	大棚
As	9.30 ± 1.85	9.18 ± 1.65	11.65 ± 1.15	11.40 ± 1.32	10.28 ± 4.12	9.70 ± 2.09
Cd	0.12 ± 0.04	0.13 ± 0.04	0.20 ± 0.08	0.24 ± 0.16	0.37 ± 0.49	0.26 ± 0.10
Cr	45.75 ± 8.15	48.04 ± 10.37	56.05 ± 9.75	58.71 ± 13.01	90.70 ± 24.30	72.46 ± 14.81
Cu	17.78 ± 2.59	18.64 ± 3.35	23.34 ± 3.07	26.03 ± 8.86	31.98 ± 12.60	28.76 ± 7.05
Hg	0.04 ± 0.06	0.04 ± 0.03	0.08 ± 0.12	0.10 ± 0.11	0.11 ± 0.10	0.10 ± 0.07
Pb	16.55 ± 2.04	16.72 ± 2.10	24.25 ± 6.53	23.69 ± 6.05	26.76 ± 4.48	24.83 ± 5.02
Zn	57.70 ± 17.15	63.46 ± 8.36	74.42 ± 14.08	90.04 ± 36.36	98.15 ± 37.27	105.89 ± 4.35

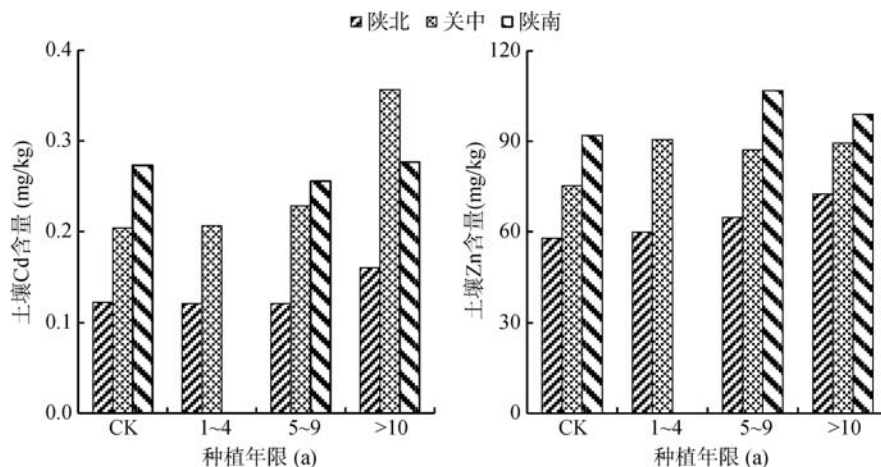


图 2 种植年限对不同区域设施土壤 Cd 和 Zn 含量的影响

## 3 讨论

### 3.1 土壤退化导致作物连作障碍与环境问题

研究结果显示, 陕西设施土壤已经呈现酸化、次生盐渍化、土壤速效养分积累、部分重金属累积超标等土壤退化问题。结合现场调查结果来看, 陕西省设施农业土壤的这些退化现象已普遍存在。土壤退化已对当地设施生产产生了一定的影响, 集中表现在作物生长出现连作障碍。一般而言, 设施土壤连作障碍主要表现在: ①土传病原菌感染引起的植物病害<sup>[21]</sup>; ②长期单一植物种植对某一种养分嗜好引起的养分失调; ③植物自毒或化感物质积累<sup>[22]</sup>。调查发现, 这些现象在陕西省不同地区的设施大棚中均有不同程度发生, 如常见的线虫病害、土壤盐渍化明显(表 1、2)、设施土壤速效磷钾比例明显失调(表 3)等。更

严重的是, 部分土壤退化显著的大棚由于无法种植已被放弃, 尤其在设施农业发展较早的地区, 如大荔、泾阳、杨凌等地区, 常见年代较老的设施大棚被弃之不用, 而另寻新的土地种植, 蚕食有限的土壤资源。

土壤退化可能还对设施环境产生较大的影响。主要表现在: ①影响作物品质。随着土壤 pH 降低、有机质积累、盐分增加等可提高土壤中重金属的生物有效性和作物的吸收。②影响水环境质量。土壤中氮磷、农药、酰胺酯等物质累积, 并会向周边水环境迁移, 尤其是陕西境内的设施灌溉主要取自地下水, 这会增加地下水和地表水中养分或污染物超标风险, 破坏水生环境<sup>[23]</sup>。③影响大气环境质量<sup>[24]</sup>。作为高量施肥生产的设施农业生态系统, 其氮肥利用很低, 调查显示设施蔬菜氮肥施用量高达每年 2 000 kg/hm<sup>2</sup>, 其中作物吸收仅利用 10% ~ 30%, 约 30% 通过氨挥发和

反硝化挥发进入大气。

### 3.2 设施土壤质量改进措施设想

设施农业土壤退化及其生态效应形成的根本原因,是这一系统内土壤高强度单一利用、农用投入品高量使用,以及封闭的设施环境<sup>[14]</sup>。为解决这一问题,当地种植户采取了多种措施进行防控。例如,现场调查发现,针对日光温室大棚,种植户选择在7、8月份歇棚期,进行土壤熏蒸或闷棚灭菌操作,这些措施对短期内的土壤退化有一定效果。然而,一旦土壤退化超出土壤的耐受能力,这些措施的作用将大大减弱,最终不得不改种其他作物或弃耕,影响土壤的产出效能,甚至浪费土地资源。因此,要从根本上解决设施农业土壤退化问题,需要转换思路,另辟蹊径。

土壤轮作休耕<sup>[2, 25-26]</sup>是一种将农业生产由强度利用型转变为生态友好型的农业生产方式,即通过合理配置资源,用养结合,促进土壤资源可持续利用,实现现代农业可持续发展。现场调查发现,不少种植户采取了一些轮作措施,如蔬菜-玉米轮作、蔬菜-蘑菇轮作等,取得了好的效果。将这些经验加以总结,并结合农产品的市场价格波动峰谷期、政府补贴政策,以及设施农业规模化生产等发展趋势,可将设施土壤轮作休耕形成体系,并加以推广,最终解决设施农业土壤退化问题,实现设施农业的可持续发展。

## 4 结论

通过对陕西省陕北、关中、陕南3个地区的重点设施农业基地调查、土壤样品采样分析,发现陕西省设施土壤质量呈现退化趋势,主要表现在4个方面:①设施土壤酸化,其中,陕南地区设施土壤pH降幅最大;②次生盐渍化,设施土壤EC值显著高于大田土壤;③土壤养分积累,其中TP、TN累积明显;④部分地区设施土壤重金属累积超过大田土壤。结合设施大棚调查资料,我们发现设施土壤退化已导致作物生产受到影响,同时土壤退化和污染物积累也可能对设施农田的生态环境产生影响。设施土壤退化的根本原因是设施土壤的高强度单一利用和高量投入。因此,采取有效措施防止设施土壤退化非常必要,而轮作休耕是防止土壤退化的重要措施之一。

### 参考文献:

[1] 史静,张乃明,包立. 我国设施农业土壤质量退化特征与调控研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 31(7): 787-794.  
 [2] 施毅超,胡正义,龙为国,等. 轮作对设施蔬菜大棚中次生盐渍化土壤盐分离子累积的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(3): 548-553.

[3] 余海英,李廷轩,周健民. 设施土壤次生盐渍化及其对土壤性质的影响[J]. 土壤, 2005, 37(6): 581-586.  
 [4] 蔡祖聪. 我国设施栽培养分管理中待解的科学与技术问题[J]. 土壤学报. 2019, 56(1): 36-43.  
 [5] 胡文友,黄标,马宏卫,等. 南方典型设施蔬菜生产系统镉和汞累积的健康风险[J]. 土壤学报, 2014, 51(5): 1045-1055.  
 [6] 刘兆辉,江丽华,张文君,等. 山东省设施蔬菜施肥量演变及土壤养分变化规律[J]. 土壤学报, 2008, 45(2): 296-303.  
 [7] 周威. 多菌灵、百菌清、毒死蜱在大棚和露地蔬菜及其土壤中的残留特征[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.  
 [8] 王少云. 多菌灵、百菌清、毒死蜱在大棚黄瓜和土壤中的残留特征及其对土壤遗传毒性的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.  
 [9] Ma T T, Wu L H, Chen L, et al. Phthalate esters contamination in soils and vegetables of plastic film greenhouses of suburb Nanjing, China and the potential human health risk[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2015, 22, 12018-12028.  
 [10] Wang J, Luo Y M, Teng Y, et al. Soil contamination by phthalate esters in Chinese intensive vegetable production systems with different modes of use of plastic film[J]. Environmental Pollution, 2013, 180: 265-73.  
 [11] 罗凯,李文红,章海波,等. 南京典型设施菜地有机肥和土壤中四环素类抗生素的污染特征调查[J]. 土壤, 2014, 46(2): 330-338.  
 [12] Yin C Y, Luo Y M, Teng Y, et al. Pollution characteristics and accumulation of antibiotics in typical protected vegetable soils[J]. Environmental Science, 2012, 33(8): 2810-2815.  
 [13] 褚素贞,王莉丽,赖丽芳. 蔬菜大棚土壤质量下降原因及改良方法的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(11): 78-80.  
 [14] Hu W, Zhang Y, Huang B, et al. Soil environmental quality in greenhouse vegetable production systems in eastern China: Current status and management strategies[J]. Chemosphere, 2017, 170: 183-195.  
 [15] 中国农业研究网. 陕西省蔬菜设施数量和面积不断增加[N]. 2015. <http://ny.chinaair.com/news/20150413/154007798.shtml>.  
 [16] 陕西省农业厅. 设施蔬菜成陕西省效益最好的农业主导产业[N]. 2015. <http://news.163.com/15/0509/19/AP6RF5J000014AEE.html>.  
 [17] 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, 2000.  
 [18] 蔡萃杨. 电感耦合等离子体质谱法测定土壤中的铜锌铅镉[J]. 四川地质学报, 2015, 3(35): 452-454.  
 [19] 杜英秋. 王水消解-原子荧光光谱法测定土中砷和汞. 黑龙江农业科学[J]. 2013(10): 100-103.  
 [20] 陈霄龙. X射线荧光光谱法检测土壤中重金属的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2014.  
 [21] 王海霞,王念平. 大棚蔬菜连作障碍防治措施[J]. 现代农业科技, 2007(16): 98-99.  
 [22] 缪其松,张聪,广建芳,等. 设施土壤连作障碍防控技术研究进展[J]. 北方园艺, 2017, 16: 180-185.  
 [23] 黄标,胡文友,虞云龙,等. 我国设施蔬菜产地土壤环境质量及管理对策[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30: 194-202.  
 [24] Wang G, Zhang R, Gomez M E, et al. Persistent sulfate formation from London Fog to Chinese haze[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2016, 113: 13630-13635.  
 [25] 钱晨晨,黄国勤,赵其国. 中国轮作休耕制度的应用进展[J]. 农学学报, 2017, 7(3): 37-41.  
 [26] 王志强,黄国勤,赵其国. 新常态下我国轮作休耕的内涵、意义及实施要点解析[J]. 土壤, 2017, 49(4): 651-657.