

# 昆山农地砷分布及成因探讨<sup>\*</sup>

张燕,高翔,彭补拙

(南京大学 地理与海洋科学学院,南京 210093)

**摘要:**土壤中的砷会经作物和径流等途径转移,甚至进入食物链而对人产生危害。为了解影响农用地土壤中砷含量的因素,选择江苏昆山农地为研究对象,探讨地理区位、土地利用方式、土壤特性与农用地土壤砷含量的关系,并用逐步回归法建立了昆山农地土壤砷含量与土壤理化参数关系的回归方程。研究表明:地形和农田的氧化还原环境会改变土壤砷含量,因此,地势高处的土壤砷含量高于地势低处,旱地高水田低。不同利用方式的旱地土壤的砷含量也不同,林地>抛荒地>菜地>玉米-西瓜田>苗圃。此外,土壤砷含量还与化肥施用量正相关,并与土壤黏粒呈正相关,却与土壤 pH、有机质、全氮和细砂粒含量呈负相关。

**关键词:**农地;砷含量;地势;氧化还原电位;黏粒;昆山

**中图分类号:**X53

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2009)04-0034-05

## Arsenic Distribution in Agricultural Land of Kunshan and Investigation of Its Contributing Factors

ZHANG Yan, GAO Xiang, PENG Bur-zhuo

(School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract:** Arsenic (As) in agricultural soil will be transferred into food chain through plants and runoff so that human health is threatened by contaminated food or water. In order to determine the factors impacting the As concentration in agricultural soil, the agricultural lands in Kunshan were chosen as the study sites. The relationship between As concentration in soil and the geographical districts, land use types, soil chemical-physical properties were discussed. The regression equations about As concentration in soil and soil chemical-physical properties were set up by step regression. It is indicated that the topography and the environment of the oxidation and reduction can change the As concentration in soil. Therefore, the As concentration in upper of terrain was higher than that in lower of terrain and the As concentration in the dry land was higher than that in paddy field. Even in the dry land the As concentrations in the different use types were also different. The As concentration order from large to small in dry land soil was forest soil, uncultivated land and wasteland, vegetable garden, maize and watermelon fields, nursery of young stocks and flowers. In addition, the As concentration has positive correlation with the percent of clay and has negative correlation with pH, the organic matter, the total nitrogen and the percent of silt.

**Key words:** agricultural land; arsenic concentration; topography; oxidation and reduction potential; clay; Kunshan

砷(俗称砒)具有毒性,会引起膀胱、肝、肾、肺等疾病甚至皮肤癌<sup>[1-2]</sup>。生物对砷的富集作用显著<sup>[3-4]</sup>,人则主要通过食物和饮用水吸收砷<sup>[5-7]</sup>。土壤作为人类与自然接触的主要界面,其中的砷来自自然活动(火山喷发、风化过程等)和人为活动(采矿、加工、燃烧、城市垃圾排放、施用农药化肥等),又

以后者对土壤砷含量的贡献更大,全球每年输入土壤的砷总量达 $(52 \sim 112) \times 10^6 \text{ kg}$ <sup>[8]</sup>。人类活动废弃的砷常沉积在土壤表面,使土壤不仅成为砷污染的汇,还是造成砷进一步污染的源,检测土壤中的砷不仅可了解土壤本身砷污染的状况,也可借此估计土壤(尤其是农用地)砷污染转移的风险,因此,人

<sup>\*</sup> 收稿日期:2008-12-12

基金项目:国家自然科学基金(40771186);江苏省自然科学基金(B K2008277);江苏省国土资源厅项目“昆山市农用地定级”专题成果

作者简介:张燕(1962-),女,江苏南京人,博士,副教授,研究方向为资源与环境。E-mail: zhangynju@sina.com

通信作者:彭补拙(1938-),男,湖南涟源人,教授,研究方向为自然地理与土地规划。E-mail: pengbuzhuo@sina.com

们对农用土壤砷污染十分关注<sup>[9-11]</sup>。通过对江苏省昆山市农用地砷的分布状况、砷与土地利用方式及与土壤理化性质的关系的探讨,期望对土壤砷的影响因素有更清楚的理解,并以此作为土壤砷污染治理和开展土壤砷转移研究的基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

昆山市位于 120°48' 21" - 121°09' 04" E, 31°06' 34" - 31°32' 36" N, 总面积 9.21 ×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>;地势南高北低,由西南向东北倾斜,平均海拔在 1.5 m 左右;气候属亚热带南部季风区,四季分明,雨量充沛,气候温和;境内湖泊众多,河港密布;南部为濒湖高田地区,中部为半高田地区,北部为低洼圩区。昆山的农业开发历史悠久,在长期耕作利用中培育了大面积肥沃的土壤,土壤类型为水稻土、沼泽土、潮土、黄棕壤;植被类型以农作物为主;种植制度为稻-麦或稻-油菜轮种一年两熟制<sup>[12]</sup>。

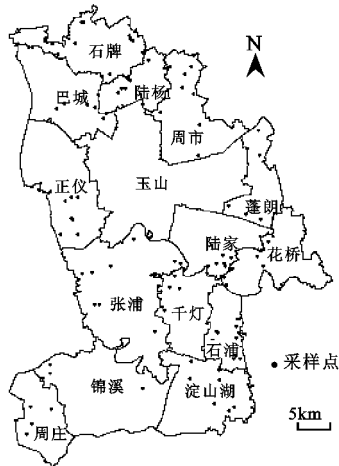


图 1 采样点及昆山行政镇分布图

1.2 样品采集与分析

考虑行政区域、土地利用方式及土种的差异,在昆山市 15 个乡镇的农用地共 100 个样点分别按梅花采样法采集样品,其中 39 个旱地样点采自菜地(23)、玉米-西瓜轮作田(7)、苗圃(3)、抛荒地(5)及林地(1),61 个水田样点主要采自稻-麦或稻-油菜轮作田;样点土壤为昆山地区典型土种(黄泥土、白土、乌泥土等);采样厚度为耕层的 0 - 15 cm。采样点分布见图 1。

土壤样品自然风干、研磨后分别过 60 目和 100 目供分析用。由中国科学院南京土壤研究所对土壤 As 含量及土壤理化性质进行了测定。其中,样品经 HNO<sub>3</sub> - H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (硫酸-硝酸)消解后用原子荧光分光光度法测定砷(As),对标准土壤样品(GSS1 - GSS8)中砷的定值测定表明测量相对误差小于

10%,而平行样品分析的相对误差小于 2%;pH 值采用玻璃电极法、有机质(OM)采用重铬酸钾容量法、全氮(TN)采用半微量开氏法、土壤机械组分采用比重法测定<sup>[13]</sup>。数据用 SPSS10 软件包处理。

2 结果与讨论

2.1 土壤砷的空间分布

按镇统计的平均砷含量如图 2 所示。由图 1 与图 2 可见,昆山农用地的土壤砷含量呈明显的南高北低、西高东低现象,可能是由于昆山由西南向东北倾斜的地形导致土壤氧化还原电位(Eh)出现空间差异,而在砷来源相似的情况下,砷在土壤中的含量与 Eh 有关<sup>[14]</sup>。

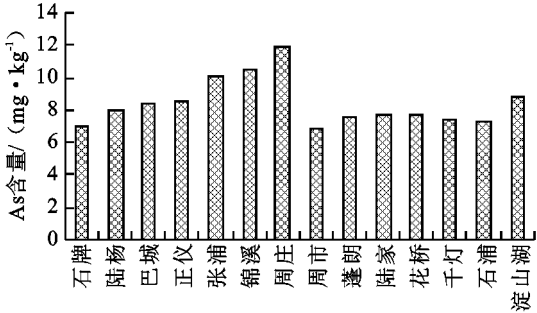


图 2 昆山各镇农用地土壤砷含量

2.2 土壤砷含量状况

昆山土壤中砷的平均含量为 8.12 mg/kg,最低含量 5.90 mg/kg,最高含量 13.25 mg/kg。虽地处江苏境内,但因地理位置更靠近上海,故以上海土壤微量元素砷背景值(9.1 mg/kg)<sup>[15]</sup>作为昆山土壤砷背景值(江苏省土壤砷背景值则为 8.9 mg/kg<sup>[15]</sup>)。昆山土壤砷含量高于背景值的样点有 19 个,占样品总量的 19%,其中水田占 11%,旱地 8%;超过背景值的样点主要分布在市域南部的周庄、张浦、锦溪、淀山湖。土壤砷含量达背景值 90%~99.9%的样点有 20 个(且大多数分布在 96%~99.9%的范围内),占样品总量的 20%,空间分布与超背景值的区域一致。即几乎有 40%的样品砷含量接近或超过背景值。我国于 1995 年颁布施行的“土壤环境质量标准”(GB15618 - 1995)规定,土壤砷污染的一级标准为 15 mg/kg,昆山土壤砷含量虽未超出国家规定的一级标准,尚未达到污染水平,但却有相当地区(尤其南部)高于区域土壤砷背景值,超出土壤背景值最高达 46%,说明这里已存在一定程度的土壤砷富集,应引起重视,防范砷富集的进一步加剧与砷污染的发生。

2.3 土地利用方式与土壤砷含量

土地利用方式不同,土壤中的砷浓度存在差异(表 1),旱地土壤的砷含量高于水田,这种现象在昆山

西部尤为明显,原因可能是砷在土壤中以砷酸盐或亚砷酸盐存在,而土壤中砷酸盐和亚砷酸盐的相互转化主要取决于土壤氧化还原条件(Eh),旱地(或干燥)土壤中以砷酸盐为主,易被土壤固定,因而旱地土壤中砷含量高;淹水条件下,随 Eh 的降低,亚砷酸盐增加,且多存在于土壤溶液中,易被植物吸收及随径流流失。灌水还使水稻田土壤 pH 值升高,土壤对砷的吸附减少,溶解度增加,导致水稻植株对砷的吸收增加<sup>[9]</sup>;且有研究表明,土壤中的砷与其上生长的作物具有显著的相关性,不同作物对土壤砷的富集能力不同,作物对砷的富集能力排序为水稻>小麦>谷子>高粱>玉米<sup>[16]</sup>,因此,作物的富集可能是昆山水田土壤中砷含量比旱地低的又一个原因,而这种“低”也许更危险,它或许暗示更多的砷已进入对人体有较大影响的食物链中,有可能由潜在的污染源转变为对人体有直接危害的“毒源”。改善排水条件则可减少水稻对砷的吸收,降低对动植物的危害<sup>[11]</sup>。

不同利用方式旱地的土壤砷含量也有差异(表 2),土壤砷含量的排序为林地>抛荒地>菜地>玉米-西瓜田>苗圃。林地常用含砷农药 [Cu

(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>·3Cu(AsO<sub>2</sub>)<sub>2</sub>,Zn(AsO<sub>2</sub>)<sub>2</sub>]杀虫、杀菌,以致林地土壤残留砷含量较高。抛荒地土壤砷含量变化较大,从 5.90~10.69 mg/kg;抛荒地各样点土壤砷含量高低与抛荒时间有关,抛荒时间越长,土壤砷含量越低,砷污染也会相应降低;但抛荒地土壤砷含量降低的速度比耕种土地要慢,致使抛荒地土壤砷含量比耕种土地高,不过,长期荒芜的土地,因砷输入减少,土壤砷含量也低。菜地分两类,一类是农家自己消费的自用菜地,另一类是供应城镇居民的蔬菜基地,可能是施用化肥与农药强度高的缘故,蔬菜基地土壤中的砷含量比农家自用菜地高;菜地大量使用磷肥,而长期使用含砷量高的磷肥,会使土壤砷不断积累<sup>[10]</sup>,又由于农家自用菜地施用的农家肥比玉米-西瓜田多,动物粪便及植物残体中的砷增加了菜地土壤砷含量,使得菜地土壤砷含量比玉米-西瓜田高。培育花卉、苗木的苗圃土壤砷含量既低又均匀,可能在于部分土壤随花卉、苗木的销售而离开了苗圃,耕层土壤不断更新造成苗圃表层土壤砷含量低且均匀。

表 1 按镇统计的昆山水田和旱地土壤砷平均含量															mg/kg
项目	石牌	陆扬	巴城	正仪	张浦	锦溪	周庄	周市	蓬朗	陆家	花桥	千灯	石浦	淀山湖	全市
水田	N	8	6	3	3	5	3	2	6	5	4	5	5	1	61
	M	6.77	7.74	8.20	8.28	9.87	9.55	11.81	6.58	7.58	7.85	7.76	7.77	7.46	7.94
	St	0.86	0.62	0.69	0.54	1.44	1.90	1.55	0.32	1.35	0.18	0.41	1.64	0.78	1.47
旱地	N	5	2	3	5	4	1	2	3	1	1	3	1	4	39
	M	7.48	8.45	8.72	8.77	10.37	13.25	12.07	7.19	7.20	7.25	7.69	5.90	6.96	8.49
	St	0.61	0.78	0.95	1.47	0.90	0.00	1.17	1.36	0.00	0.00	0.92	0.00	0.41	1.76

注:N 为样本数,M 为平均值,St 为标准差。

表 2 不同利用方式旱地土壤的砷平均含量						mg/kg
利用方式	样本数	平均值	标准差	最大值	最小值	
苗圃	3	6.74	0.77	7.63	6.20	
玉米-西瓜田	7	8.01	1.09	9.68	6.64	
菜地	23	8.61	1.73	13.25	6.62	
抛荒地	5	8.75	1.80	10.69	5.90	
林地	1	12.90	-	-	-	

2.4 化肥施用量与土壤砷含量

当地农户对不同生产力的土地所施用的化肥量不同(表 3),高产田施用的化肥量最高,中低产田施用的化肥量差异很小。而按高、中、低土地生产力分类计算的土壤砷含量分别为 9.30(N=20)、7.85(N=63)和 7.92(N=17),高产田的土壤砷含量明显高于中低产田,中低产田间的差异很小,昆山农地土壤砷含量与化肥施用量成正相关,可能与生产化肥

的原料中含砷有关,长期高强度使用化肥造成了相当数量的砷在土壤中富集。

2.5 土壤理化性质与土壤砷含量

计算土壤砷含量与土壤理化性质间的相关系数,无论是全体样本还是分为旱地样本与水田样本或者是分作西部样本与东部样本,土壤砷含量均与 pH、OM、TN、P<sub>1</sub>(0.05~0.002 mm 细砂粒含量)负相关,与 P<sub>2</sub>(<0.002 mm 黏粒含量)正相关,且大部分达到在置信度 0.01 水平或 0.05 水平的显著相关(表 4)。

土壤砷与 pH 呈显著负相关。研究表明:在偏碱环境中,农田径流污染元素流失能力排序为 As>Cd>Zn>Ni>Hg、Pb<sup>[17]</sup>,即随 pH 值升高,土壤对砷的吸附减少,溶解增加,砷流失增加,说明砷比其它元素有较强的迁移能力,但砷迁移离开土壤可能会引起水源污染,应对此引起重视。

表 3 昆山农地生产力及化肥施用量									kg/ (hm <sup>2</sup> · a)
项目	水稻			小麦			油菜		
	高产田	中产田	低产田	高产田	中产田	低产田	高产田	中产田	低产田
产量	> 9000	6750 ~ 9000	< 6750	> 3150	2400 ~ 3150	< 2400	> 2250	1500 ~ 2250	< 1500
N 肥	450 ~ 750	450 ~ 600	420 ~ 480	375 ~ 600	375 ~ 480	375 ~ 450	480 ~ 525	450 ~ 480	420 ~ 450
P 肥	450 ~ 675	450 ~ 480	450 ~ 525	300 ~ 525	300 ~ 375	375 ~ 480	480 ~ 525	450 ~ 480	390 ~ 480
K 肥	300 ~ 375	225 ~ 330	225 ~ 375	300 ~ 375	300 ~ 375	300 ~ 480	480 ~ 525	450 ~ 480	375 ~ 420

表 4 土壤砷含量与土壤理化性质间的相关系数						
项目	样品数	pH	OM	TN	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>
全样	100	- 0.269 **	- 0.329 **	- 0.314 **	- 0.526 **	0.567 **
水田	61	- 0.231	- 0.391 **	- 0.380 **	- 0.499 **	0.514 **
旱地	39	- 0.305	- 0.170	- 0.175	- 0.614 **	0.676 **
西部	52	- 0.463 **	- 0.300 *	- 0.247	- 0.593 **	0.634 **
东部	48	- 0.166	- 0.324 *	- 0.355 *	- 0.202	0.286 *

注: \*\*在置信度为 0.01 水平下显著相关, \*在置信度为 0.05 水平下显著相关。

土壤砷与 OM 间存在显著负相关关系,可以这样解释<sup>[18]</sup>,土壤对砷的吸附主要通过带正电荷的微粒和带负电荷的砷络阴离子之间的相互作用来实现,土壤中的 OM 是一种带负电荷的胶体,它与土壤间的吸附反应常优先于砷络阴离子与土壤间的吸附反应,因此,当土壤中的有机质含量增高,土壤颗粒所带正电荷就相应减少,最终结果便呈现为土壤中砷和有机质之间的负相关性。值得注意的是,昆山农地土壤 OM 自 20 世纪 60 年代以来除 1980 - 1982 年间略有上升之外,均处于下降(图 3),农地 OM 的降低会导致土壤吸附砷的能力提高,加大土壤砷污染的风险。

土壤砷与 TN 之间存在显著负相关关系,可能是因氮与砷属同族元素,氮与砷竞争相同吸附点位而抑制了土壤对砷的吸附,使 TN 与砷呈负相关。昆山农地土壤 TN 从 20 世纪 70 年代以来一直在增加(图 3),这有利于降低土壤砷富集,减轻土壤砷污染的风险。

砷与 P<sub>1</sub> 间呈显著负相关,而与 P<sub>2</sub> 间呈显著正

相关。因为土壤粒度越细,其表面积越大,土壤对砷的吸附能力也就越大,所以土壤细砂粒含量越高砷含量越低,土壤黏粒含量越高砷含量越高。

通过逐步回归法得到昆山农地土壤砷含量与土壤理化参数的回归方程(表 5)。由回归方程可见,昆山农地土壤砷含量主要取决于土壤黏粒含量;当考虑两参数时,水田土壤的砷含量还与 OM 关系密切,而旱地土壤的砷含量则还与 pH 更密切些;影响西部农地土壤砷含量的主要参数是黏粒和 OM,影响东部土壤砷含量的参数却只有 TN 一个。据此可以对昆山不同利用方式及不同区域的农地土壤砷含量进行预测。

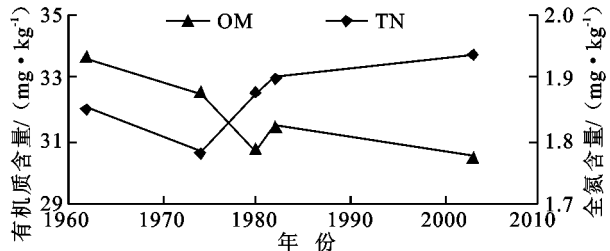


图 3 昆山农地有机质与全氮变化状况

表 5 昆山土壤砷含量的回归方程			mg/ kg
全样	$Y_{As} = 3.710 + 0.183 C_{P_2}$	$Y_{As} = 5.831 + 0.183 C_{P_2} - 1.080 C_{TN}$	
水田	$Y_{As} = 3.947 + 0.162 C_{P_2}$	$Y_{As} = 6.346 + 0.138 C_{P_2} - 0.0552 C_{OM}$	
旱地	$Y_{As} = 3.311 + 0.218 C_{P_2}$	$Y_{As} = - 7.771 + 0.384 C_{P_2} + 1.084 C_{pH}$	$Y_{As} = - 4.288 + 0.365 C_{P_2} 0.843 C_{pH} - 0.808 C_{TN}$
西部	$Y_{As} = 3.400 + 0.211 C_{P_2}$	$Y_{As} = 5.352 + 0.216 C_{P_2} - 0.0708 C_{OM}$	$Y_{As} = 5.298 + 0.191 C_{P_2} - 0.138 C_{OM} + 0.0191 C_{TN}$
东部	$Y_{As} = 9.380 - 0.198 C_{TN}$		

注: Y<sub>As</sub>为砷含量预测值, C<sub>P<sub>2</sub></sub>、C<sub>OM</sub>、C<sub>pH</sub>、C<sub>TN</sub>分别为土壤黏粒、有机质、pH 值和全氮含量。

3 结 论

(1) 地形对昆山农地土壤砷的空间分布有影响,以致产生自西南向东北降低的现象。

(2) 昆山农地土壤砷含量与土地利用方式关系

也很密切,表现为旱作土壤砷含量高于水稻田,旱作土壤砷含量排序为:林地 > 抛荒地 > 菜地 > 玉米 - 西瓜田 > 苗圃。而不同利用方式的土壤砷含量差异很可能意味着土壤中的砷向作物及径流发生了不同程度的转移,因此,应十分关注不同利用方式土壤中

砷的迁移方向。

(3) 土壤砷含量还与化肥施用量及土壤理化性质有关, 昆山农地的土壤砷含量就与化肥施用量成正相关, 且与  $pH$ 、 $OM$ 、 $TN$ 、 $P_1$  负相关, 与  $P_2$  正相关。因而改善土壤理化条件(如提高土壤  $OM$ 、 $TN$  含量)可有效减少土壤砷含量, 降低土壤砷污染的风险。

#### 参考文献:

- [1] 毕伟东, 王成艳, 王成贤. 砷及砷化物与人类疾病[J]. 微量元素与健康研究, 2002, 19(2): 76-79.
  - [2] 张晓红, 陈敏. 砷的污染毒性及对人体健康的影响[J]. 甘肃环境研究与监测, 1999(12): 215-218.
  - [3] 谢正苗, 廖敏, 黄昌勇. 砷污染对植物和人体健康的影响及防治对策[J]. 广东微量元素科学, 1997, 4(7): 17-21.
  - [4] 席玉英, 李峰, 樊甲仁. 铬砷在土壤和作物体内积累与迁移规律的研究[J]. 山西大学学报: 自然科学版, 1989, 12(4): 472-480.
  - [5] 张辉. 地带性人群砷中毒的环境背景因素及其研究现状[J]. 地质评论, 2000, 46(4): 443-449.
  - [6] Hering J G. Risk assessment for arsenic in drinking water: limits to achievable risk levels[J]. Journal of Hazardous materials, 1996, 45: 175-184.
  - [7] Tripathi R M, Raghunath R, Krishnamoorthy T M. Arsenic Intake by the Population in Bombay City[J]. Science of the Total Environment, 1997, 208: 89-95.
  - [8] Nriagu, J O, Paeyna, J M. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soil by trace metals[J]. Nature, 1988, 333(6169): 134-139.
  - [9] 陈同斌, 刘更另. 土壤中砷的吸附和砷对水稻的毒害效应与  $pH$  值的关系[J]. 中国农业科学, 1993, 26(1): 63-68.
  - [10] 李英伦, 蒲富永. 铜铅镉砷在紫色丘陵农田中的径流迁移[J]. 农业环境保护, 1992, 11(2): 60, 66-71.
  - [11] Abedin, M J, Cotter-Howells J, Meharg A A. Arsenic uptake and accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) irrigated with contaminated water[J]. Plant and Soil, 2002, 240: 311-319.
  - [12] 昆山市农业志编纂委员会. 昆山市农业志[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1995. 60-61, 154.
  - [13] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 44, 55, 68.
  - [14] 蒋成爱, 吴启堂, 陈杖榴. 土壤中砷污染研究进展[J]. 土壤, 2004, 36(3): 264-270.
  - [15] 中国环境监测总站主编. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 330.
  - [16] 张红, 郭翠花. 太原市土壤 - 作物系统中 As 行为研究[J]. 农业环境保护, 2000, 19(3): 169-170.
  - [17] 魏显有, 王秀敏, 刘云惠, 等. 土壤中砷的吸附行为及其形态分布研究[J]. 河北农业大学学报, 1999, 22(3): 28-31.
  - [18] 翁焕新, 张霄宇, 邹乐君, 等. 中国土壤中砷的自然存在状况及其成因[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2000, 34(1): 88-92.
- 
- (上接第 33 页)
- [8] 唐克丽, 陈永宗. 黄土高原地区土壤侵蚀区域特征及其治理途径[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1990: 62-67.
  - [9] 彭珂珊. 我国西部的生态问题与退耕还林[J]. 首都师范大学学报: 自然科学版, 2001, 22(1): 100-105.
  - [10] 唐克丽. 开发西部切入点的研究: 以黄土高原生态环境建设切入点为例[J]. 第四纪研究, 2000, 20(6): 504-513.
  - [11] 唐克丽, 张科利, 雷阿林. 子午岭林区自然侵蚀和人为加速侵蚀剖析[M]//唐克丽. 土壤侵蚀与生态环境演变研究论文集. 西安: 陕西科学技术出版社, 1993: 17-27.
  - [12] 蔡庆, 唐克丽, 陈文亮. 林地开垦人为加速侵蚀的人工降雨试验研究[M]//唐克丽. 土壤侵蚀与生态环境演变研究论文集. 西安: 陕西科学技术出版社, 1993: 79-86.
  - [13] 赵金荣, 孙立达, 朱金兆. 黄土高原水土保持灌木[M]. 北京: 中国林业出版社, 1994: 10-15.
  - [14] 罗伟祥, 杨江峰. 黄土高原防护林在生态环境建设和防灾减灾中的作用[J]. 水土保持研究, 2001, 8(2): 1-4.
  - [15] 吴钦孝, 赵鸿雁. 植被保持水土的基本规律和总结[J]. 水土保持学报, 2001, 5(4): 13-15.
  - [16] 吴钦孝, 赵鸿雁, 韩冰. 植被保持土壤的人工降雨试验研究[M]//黄河中游防护林体系建设与水土保持. 西安: 西北大学出版社, 2000: 93-97.
  - [17] 刘勇, 冉大川. 黄河中游水土保持措施保存面积的核实初探[J]. 水土保持通报, 1994, 14(4): 39-58.
  - [18] 蒋定生. 黄土高原水土流失与治理模式[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997: 106-113, 329-403.
  - [19] 侯庆春, 黄旭, 韩仕峰. 黄土高原地区小老树成因及其改造途径的研究 I: 小老树的分布及其生长特点[J]. 水土保持学报, 1991, 5(1): 64-72.
  - [20] 邹远厚, 关秀琦, 韩蕊莲, 等. 关于黄土高原植被恢复的生态学依据探讨[J]. 水土保持学报, 1995, 9(4): 1-4.
  - [21] 梁一民. 从植物群落学原理谈黄土高原植被建设的几个问题[J]. 西北植物学报, 1999, 19(5): 26-31.
  - [22] 侯庆春, 韩蕊莲. 黄土高原植被建设中的有关问题[J]. 水土保持通报, 2000, 20(2): 53-56.
  - [23] 陈云明, 梁一民, 程积民. 黄土高原草本植被建设的地带性特征[J]. 植物生态学报, 2002, 26(3): 339-345.
  - [24] 袁嘉祖, 闵庆文. 水是西北地区生态系统重建的根本[J]. 自然资源学报, 2001, 16(5): 511-515.
  - [25] 周晓峰. 关于西部大开发的基本观点和植被建设中的若干问题[J]. 林业科学, 2001, 37(6): 97-104.