基于 Meta 分析的中国北方植被建设对土壤水分影响*

李 刚[1,2**] 刘立超[1] 高艳红[1] 杨昊天[1,2] 王艳莉[1,2]

([1]中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 沙坡头沙漠研究试验站, 兰州 740000; [2]中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要 植被建设是中国北方干旱半干旱地区防治风蚀和水蚀的最为有效手段,而合理的植被建设需要考虑土壤水分的植被承载力。在收集有关中国北方干旱半干旱地区植被建设后土壤水分研究文献的基础上,采用 Meta 分析研究了该地区植被建设(乔木和灌木)对土壤水分的影响。结果表明:北方干旱半干旱地区植被建设总体上对深层(40 cm 以下)土壤水分含量产生显著降低作用(结合效应值为-0.40);乔木栽植导致土壤水分含量大幅度降低(-0.58),灌木栽植也在一定程度上导致土壤水分含量降低(-0.27),但其影响不显著;亚组分析表明,建植年限<20 a 的乔木以及栽植在降雨量超过 400 mm 以上地区的乔木是导致土壤水分含量显著降低的主要因素(其结合效应值分别为-0.62 和-0.69);因此,乔木栽植对于土壤水分的消耗大于灌木,在该地区开展灌木栽植能够有效提高土壤水分利用效率。

关键词 干旱半干旱地区; 植被建设; 土壤水分; meta 分析

中图分类号 Q142.3 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2014)9-2462-09

Influence of vegetation construction on the soil moisture in northern China: A meta analysis. LI Gang[1,2**], LIU Li-chao[1], GAO Yan-hong[1], YANG Hao-tian[1,2], WANG Yan-li[1,2] ([1]*Shapotou Desert Research & Experiment Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou* 740000, *China*; [2]*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2014, **33**(9): 2462-2470.

Abstract: Vegetation construction is the most effective way to control erosion by wind and water in the arid and semi-arid regions of northern China. Reasonable vegetation construction needs to consider the vegetation carrying capacity of soil water. Based on published literatures of soil water change following revegetation in the arid and semi-arid regions of northern China, this paper analyzed the influences of two kinds of vegetation construction (trees and shrubs) on soil water at different depths using a meta-analysis. The results showed that vegetation construction produced prominent negative effects on soil water in deep layers (below 40 cm, with an effect size of -0.40). Tree planting resulted in a significant decrease in soil water (effect size: -0.58), while shrub planting had a negative effect on soil water (effect size: -0.27) though no significant influence was found. According to the subgroup analysis, tree plantations in the zones with precipitation of more than 400 mm and with the stand ages of less than 20 years led to decline of soil water (effect sizes: -0.62 and -0.69, respectively). The results indicated that tree planting produced more negative influences on soil water environments than shrub planting, and shrub planting could improve soil water-use efficiency in the arid and semi-arid regions.

Key words: arid and semi-arid regions; vegetation construction; soil moisture; meta-analysis.

* 国家重点基础研究发展计划项目(2013CB429901)资助。

** 通讯作者 E-mail: ligang5721@163.com

收稿日期: 2014-01-23 接受日期: 2014-05-20

植被建设是生态恢复与重建最为重要的环节之一(王新平等,2004)。多年的生产实践证明,以退耕还林、种树种草和恢复植被为代表的生物工程治理是控制水土流失、改善生态环境的根本措施(张雷明和上官周平,2002)。合理的植被建设不仅要考虑到当地的社会、经济发展的现状,而且必须结合当地的自然生境特点。

在中国北方干旱半干旱地区,植被建设是防治荒漠化和控制沙尘暴最为常用的措施之一。由于地处降水稀少的大陆腹地,水分是限制该地区植被建设最为关键的因子。在植被建设中综合考虑植被-土壤系统水量平衡问题显得尤为重要(李新荣等,2013)。土壤水分是植物能够直接利用的水分来源之一,其他的水分来源(降雨、地下水及地表水)首先要转化为土壤水方能被植物利用。不同的土壤水分格局,决定了生态系统的空间分布及格局(山仑等, 2000)。同时,土壤水分状况对人工固沙植被的长期稳定发展具有重要影响(冯金朝等,1995;付华等,2001;Wang *et al*. 2004;王志等,2006)。在干旱半干旱地区,土壤水分更具有特殊的生理生态意义,严重影响着该地区林木的生长发育、结构类型和分布特点。而植被又是影响土壤水分最活跃最积极的因素(许喜民等,2006)。因此,对该地区现有植被与土壤水分状况的研究,不仅有利于认识二者的作用规律,而且可为该地区土壤水分的有效利用及区域植被恢复提供重要的理论参考。

近年来,有关干旱、半干旱地区人工植被区土壤水分平衡和动态变化的研究表明,植物生长过程中的耗水量、植被建设种类、植被建植年限以及植被建植区域的差异,都会对建植区域土壤水分产生不同的影响,从而导致不同的生态后果。一方面植被建设对于土壤水分涵养、水土保持等具有积极作用;另一方面,由于人工植被生长需水量大幅增加等因素的影响,这些地区植被建设后出现土壤干燥化的现象(李军等,2008)。目前国内外针对中国干旱半干旱地区植被建设对土壤水分影响的相关研究并不少见(杨文治和韩仕峰,1985;孙长忠和黄宝龙,1998;李新荣等,2001;莫保儒等,2009),但这些研究大部分都局限于小范围内的研究,缺少对同类研究的综合分析;同时,由于单个研究结果具有不确定性和偏差(Rosenthal & Dimatteo,2001;Noble,2006)以及发表偏见(Begg,1994;Cooper & Hedges,1994),一些研究结论会出现不一致或相互矛盾的现象(高尚武,1984;刘光祖,1987;刘瑛心,1991;沈渭寿,1999;吴祥云等,2004)。

Meta 分析是针对一系列拥有共同研究目标的多个独立实验结果进行定量综合分析的方法(Gurevitch & Hedges,1993;Scheiner *et al*. ,1993;Cooper & Hedges,1994)。自 20 世纪 90 年代初被引入生态学研究领域以来,Meta 分析已迅速被应用于解决各种生态学问题(Curtis & Wang,1998;Peterson *et al*. ,1999)。本文基于 Meta 分析的方法,通过对前人发表的相关独立研究结果进行定量合并分析,量化植被建设对土壤水分所产生的平均响应程度,并通过深度的亚组分析,讨论不同降水区域人工植被建设中,植被类型、建植年限等因子对土壤水分的影响特征,揭示中国北方干旱半干旱地区植被建设对土壤水分影响的普遍性规律,为该地区人工植被建设及生态恢复提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　文献来源

在搜集文献的过程中发现,有关中国北方植被建设对土壤水环境影响的文献主要是以中文形式发表;部分以英文形式发表的,也可以在一些中文文献中查到相关结果。因此,本文的主要文献来源是中国 CNKI 学术总库、维普中文科技期刊数据库。通过建立严格的文献筛选标准(表 1),本项研究共搜集到 32 篇涉及干旱半干旱地区植被建设对土壤水分影响的文献作为再分析和研究的对象(表 2)。

1.2　数据处理

本文选用反应比 ln$R$ 来计算作为效应值(ES),使得文中不同独立试验中的数据具有可比性(Johnson & Curtis,1999)。反应比的计算公式为:

$$ES=\ln R=\ln(X_e/X_c)=\ln X_c-\ln X_c \quad (1)$$

式中:X_e 为试验组值,表示植被建设区林下的土壤水分含量;X_c 为来自于同一文献中与 X_e 对应的对照组值,表示植被建设前的土壤含水量。

表 1　文献检索标准

Table 1　Standard of literature retrieval

序号	文献筛选标准
1	文献的数据资料里至少包含一种植被建设(乔木建设、灌木建设)对土壤水分的影响
2	文献的数据资料里必须具有实验组和对照组
3	文献资料的数据应是具体的数值(包括图表),数据包含平均值和标准差或者标准误
4	具有重复报道的数据值选用其中一种

表2 Meta分析文献

Table 2 References of meta analysis

编号	研究地区	植被类型	资料来源
1	内蒙古乌兰察布市	乔木	陈晓燕,2010
2	内蒙古乌兰敖都地区	灌木	曹成有和刘世延,2000
3	内蒙古磴口县	灌木	贾玉奎等,2006
4	山西省偏关县	乔木,灌木	原焕英和许喜民,2004
5	甘肃省定西市	乔木,灌木	莫保儒等,2009
6	内蒙古乌兰敖都地区	灌木	阿拉木萨等,2005
7	内蒙古奈曼旗	乔木,灌木	何志斌和赵文智,2003
8	陕西省吴起县	乔木,灌木	刘中奇等,2010
9	宁夏彭阳县	灌木	王思成等,2009
10	甘肃省榆中县	灌木	刘讯,2009
11	宁夏中卫市	灌木	李新荣等,2001
12	甘肃省定西市	乔木,灌木	王子婷等,2009
13	甘肃省临泽县	乔木	刘发民等,2001
14	内蒙古乌兰敖都地区	灌木	曹成有等,2004
15	内蒙古乌兰敖都地区	灌木	王娟等,2009
16	山西省五寨县	灌木	杨治平等,2010
17	甘肃省定西市	乔木,灌木	杨永东,2008
18	陕西省安塞县	乔木,灌木	陈云明等,2002
19	陕西省安塞县	灌木	胡梦珺和刘文兆,2004
20	山西省吉县	乔木,灌木	余新晓和张建军,1996
21	陕西省富县	乔木	王力等,2005
22	山西省吉县	乔木	张建军等,2011
23	山西省偏关县	乔木,灌木	许喜民等,2006
24	甘肃省定西市	乔木,灌木	王志强等,2005
25	山西省偏关县	乔木,灌木	原焕英等,2004
26	宁夏固原市	乔木	邱丽萍,2007
27	甘肃省庆阳市	乔木,灌木	邱丽萍和张兴昌,2010
28	甘肃省临泽县	灌木	刘发民等,2002
29	宁夏盐池县	灌木	王博,2007
30	陕西省吴旗县	灌木	丛心海等,1990
31	山西省汾河流域	乔木	牛俊杰等,2007
32	辽宁省彰武县	灌木	崔国发,1998

在合并分析效应值前,通常采用卡方检验法进行异质性检验。当异质性结果 $P>0.05$ 时,可认为多个同类研究具有同质性,选用固定模型计算结合效应;当异质性的结果 $P<0.05$ 时,可认为多个同类研究结果具有统计学差异,选择随机效应模型计算结合效应值(刘关键等,2003)。卡方检验法的计算公式如下:

$$Q = \sum W_i r_i^2 - \frac{(\sum W_i r_i)^2}{\sum W_i} \quad (2)$$

$$W_i = 1/V_i \quad (3)$$

式中:r_i 为单个研究的效应值;W_i 为每个研究的权重,权重的大小为每个效应值的方差(V_i)倒数。通过公式(2)计算出来的 Q 值服从自由度为 $K-1$ 的卡方分布,因此,根据所计算出的 Q 值查阅卡方界值表就可以得出概率值 P。

根据异质性检验的结果,当 $P>0.5$ 时,采用固定效应模型计算结合效应值,其计算公式为:

$$ES = \frac{\sum W_i r_i}{\sum W_i} \quad (4)$$

若 $P<0.5$ 时,则采用随机效应模型计算结合效应值,其计算公式为:

$$ES = \frac{\sum W_i^* r_i}{\sum W_i^*} \quad (5)$$

式中,

$$W_i^* = D + \frac{1}{W_i} \quad (6)$$

$$D = \frac{Q - (K-1)}{(\sum W_i - \frac{\sum W_i^2}{\sum W_i})} \quad (7)$$

结合效应值的95%置信区间的计算公式为:

$$95\%\ CI = ES \pm t_{0.05} SE \quad (8)$$

$$SE = \sqrt{\frac{1}{W_i}} \quad (9)$$

式中,ES 为通过合并单个研究的效应值所获得的结合效应值,SE 为结合效应值的标准误。当结合效应值 $ES>0$ 时,说明植被建设对土壤水分含量有增加效应;当结合效应值 $ES<0$ 时,说明植被建设对土壤水分有降低效应。如果该分析结果的结合效应值置信区间与0重叠,表明植被建设对土壤水分的影响未达到统计学显著水平($P>0.05$);置信区间不包括0(均大于0或者均小于0),即说明 $P<0.05$,表明植被建设对土壤水分的影响有统计学差异(刘鸣,2010)。Meta分析过程在Excel 2007和Stata 11等软件中进行。

2 结果与分析

2.1 植被建设对土壤水分影响的总体特征

由表3可见,干旱半干旱地区植被建设总体上对土壤水分的变化具有显著影响。人工植被栽植对0~20、20~40、40~60、60~80、80~100和100 cm以下各层土壤水分的结合效应值分别为-0.16、-0.39、-0.53、-0.44、-0.49和-0.54。说明,在中国干旱半干旱地区,人工植被栽植将导致土壤水分含量降低。其中,植被建设对表层土壤水分的降低效应不显著,对20 cm以下的土壤水分含量有显著降低作用。这主要是因为建植的人工植物根系分布

较深,这些植物生长主要利用了较深层的土壤水分。

2.2　乔木栽植对土壤水分影响的基本特征

2.2.1　乔木栽植对土壤水分影响的总体特征　利用表2中涉及乔木建设的17篇文献(表2中的文献1、4、5、7、8、12、13、17、18、20~24、26、27、31)的研究结果进行 Meta 分析(表4)。结果表明,人工乔木林对各层土壤水分含量的结合效应值分别为-0.21、-0.56、-0.75、-0.70、-0.73 和-0.75,表明乔木栽植对土壤水分含量有降低作用。其中 0~20 cm 的土壤水分含量结合效应值的置信区间包含 0,其余各层土壤水分含量结合效应值的置信区间不包括0,说明乔木建设对 0~20 cm 的土壤水分的影响不显著,对 20 cm 以下的土壤水分含量有着显著降低作用。

2.2.2　不同建植年限乔木栽植对土壤水分影响的亚组分析　将乔木按建植年限(<20、20~40、>40 a)即乔木林的幼林、成林及过熟林分为 3 个林龄段进行亚组分析。检索到的文献中,有关<20 a 乔木建设的相关文献共有 11 篇,分别是表 2 中的 1、4、7~9、13、17、20、23、25 和 31。通过 Meta 分析(表5)表明,<20 a 的人工乔木对各层土壤水分含量产生降低效应,对40 cm以下的土壤水分含量产生显著降低效应,而对 40 cm 以上的土壤水分含量的影响不显著。

对表 2 中有关乔木栽植年限介于 20~40 a 的10篇相关文献(表2中的1、9、12、13、17、20、21、24、27 和31)的 Meta 分析(表6)发现,20~40 a 乔木栽植对各层土壤水分含量有降低效应,但影响均未达到显著水平。

表2中涉及建植年限超过 40 a 以上的人工乔木林的文献共有 6 篇,分别是 1、5、9、26、27 和 31。通过 Meta 分析(表7)表明,超过 40 a 的乔木对 20 cm 以下的土壤水分含量产生降低效应,对表层土壤水分含量产生增加效应,但影响均不显著。

表3　植被建设对土壤水分影响的基本特征

Table 3　Basic characteristics of the impact of vegetation construction on soil moisture

土壤深度(cm)	试验数	模型选择	结合效应值	*P*	95%置信区间
0~20	177	固定模型	-0.16	0.229	(-0.41,0.10)
20~40	77	随机模型	-0.39	0.017	(-0.72,-0.07)
40~60	77	随机模型	-0.53	0.001	(-0.86,-0.21)
60~80	77	随机模型	-0.44	0.008	(-0.76,-0.12)
80~100	75	随机模型	-0.49	0.003	(-0.82,-0.16)
>100	71	随机模型	-0.54	0.002	(-0.88,-0.20)
整体	554	固定模型	-0.40	0.405	(-0.53,-0.27)

表4　乔木栽植对土壤水分影响的基本特征

Table 4　Basic characteristics of the impact of tree planting on soil moisture

土壤深度(cm)	试验数	模型选择	结合效应值	*P*	95%置信区间
0~20	46	固定模型	-0.21	0.321	(-0.62,0.20)
20~40	32	固定模型	-0.56	0.031	(-1.07,-0.05)
40~60	34	随机模型	-0.75	0.004	(-1.26,-0.24)
60~80	33	随机模型	-0.70	0.008	(-1.21,-0.18)
80~100	35	随机模型	-0.73	0.004	(-1.23,-0.23)
>100	36	随机模型	-0.75	0.003	(-1.24,-0.25)
整体	216	固定模型	-0.58	0.469	(-0.78,-0.39)

表5　建植<20 a 乔木对土壤水分影响的基本特征

Table 5　Basic characteristics of the impact of tree planting between 0 to 20 years on soil moisture

土壤深度(cm)	试验数	模型选择	结合效应值	*P*	95%置信区间
0~20	24	固定模型	-0.27	0.359	(-0.84,0.30)
20~40	22	固定模型	-0.52	0.097	(-1.13,0.09)
40~60	19	随机模型	-0.74	0.032	(-1.43,-0.06)
60~80	19	随机模型	-0.72	0.037	(-1.40,-0.04)
80~100	24	随机模型	-0.82	0.009	(-1.43,-0.21)
>100	23	随机模型	-0.72	0.022	(-1.34,-0.11)
整体	131	固定模型	-0.62	0.808	(-0.87,-0.36)

表6　建植 20~40 a 乔木对土壤水分影响的基本特征

Table 6　Basic characteristics of the impact of tree planting between 20 to 40 years on soil moisture

土壤深度(cm)	试验数	模型选择	结合效应值	*P*	95%置信区间
0~20	6	固定模型	-0.29	0.619	(-1.44,0.85)
20~40	5	固定模型	-1.63	0.057	(-3.31,0.05)
40~60	7	固定模型	-0.83	0.233	(-2.20,0.54)
60~80	7	固定模型	-0.79	0.307	(-2.32,0.73)
80~100	6	固定模型	-0.69	0.366	(-2.18,0.80)
>100	8	固定模型	-0.74	0.282	(-2.08,0.60)
整体	39	固定模型	-0.75	0.889	(-1.32,-0.18)

表7　建植 40 a 以上乔木对土壤水分影响的基本特征

Table 7　Basic characteristics of the impact of tree planting after 40 years on soil moisture

土壤深度(cm)	试验数	模型选择	结合效应值	*P*	95%置信区间
0~20	11	固定模型	0.08	0.849	(-0.76,0.92)
20~40	5	固定模型	-1.78	0.046	(-3.53,0.03)
40~60	7	固定模型	-0.91	0.125	(-2.08,0.25)
60~80	5	固定模型	-1.02	0.161	(-2.45,0.41)
80~100	8	固定模型	-0.81	0.137	(-1.88,0.26)
>100	7	固定模型	-0.69	0.224	(-1.88,0.42)
整体	43	固定模型	-0.63	0.407	(-1.10,-0.16)

2.2.3 不同降雨量区域乔木栽植对土壤水分影响的亚组分析 由于乔木建设区域主要集中于降雨量较大的区域,因此本文将乔木按降雨量区域(0~400 mm地区及400 mm以上地区)分为两个大的区域分类进行亚组分析。其中涉及年降雨量0~400 mm地区乔木栽植的相关文献共9篇(表2中的4、5、7~9、12、13、23和27)。由表8可见,该区域乔木栽植对土壤水分产生降低效应,但是影响不显著。

对表2中有关年降雨量400 mm以上地区进行乔木栽植的10篇文献(1、4、9、13、17、20、21、24、26和31)的Meta分析(表9)表明,该地区人工乔木林对土壤水分含量有降低效应,其中对0~40 cm土壤水分的降低作用不显著,对40 cm以下的土壤水分含量有显著降低效应。

2.3 灌木栽植对土壤水分影响的基本特征

2.3.1 灌木栽植对土壤水分影响的总体特征 本项研究搜集到的文献中,共有26篇(表2的2~12、14~20、23~25、27~30和32)涉及灌木栽植对土壤水分的影响。通过Meta分析发现,灌木栽植对该地区的土壤水分含量有降低效应,但影响不显著(表10),说明该地区土壤水分含量受到灌木栽植活动的影响较小。

2.3.2 不同建植年限的灌木栽植对土壤水分影响的亚组分析 本文将灌木按建植年限(<10、10~20、>20 a)即分别为灌木的幼林、成林和过熟熟林分为3个林龄段进行亚组分析。检索文献中,有关<10 a灌木栽植的相关文献共有11篇(表2的2、6、8、10、14~16、18~20和32)。通过Meta分析(表11)表明,灌木栽植对20 cm以下土壤水分含量有降低作用,对0~20 cm的土壤水分含量产生增加作用,但影响均不显著。

对表2中有关灌木栽植介于10~20 a的16篇相关文献(表2的2~4、6~8、10-12、14~17、19、24和28)的Meta分析(表12)发现,该林龄段的灌木建设对不同深度的土壤水分含量均有降低效应,但影响均未达到显著水平。

表2中涉及建植年代超过20 a以上的人工灌木林的文献共有9篇(3~5、8、11、15、16、23和27)。通过Meta分析(表13)表明,建植年限超过20 a的灌木对土壤水分有降低效应,但其影响不显著。

2.3.3 不同降雨量区域灌木栽植对土壤水分影响的亚组分析 由于灌木在北方干旱半干旱地区均可

表8 年降雨量<400 mm地区乔木栽植对土壤水分影响的基本特征

Table 8 Basic characteristics of the impact of tree planting on soil moisture in the regions where the precipitation is less than 400 mm

土壤深度(cm)	试验数	模型选择	结合效应值	*P*	95%置信区间
0~20	14	固定模型	-0.12	0.745	(-0.87,0.62)
20~40	7	固定模型	-0.43	0.430	(-1.51,0.64)
40~60	8	随机模型	-1.01	0.076	(-2.12,0.11)
60~80	11	随机模型	-0.58	0.192	(-1.46,0.29)
80~100	11	随机模型	-0.50	0.254	(-1.37,0.36)
>100	9	固定模型	-0.49	0.314	(-1.45,0.46)
整体	60	固定模型	-0.47	0.875	(-0.84,0.10)

表9 年降雨量400 mm以上地区乔木对土壤水分影响的基本特征

Table 9 Basic characteristics of the impact of tree planting on soil moisture in the regions where the precipitation is more than 400 mm

土壤深度(cm)	试验数	模型选择	结合效应值	*P*	95%置信区间
0~20	29	固定模型	-0.24	0.365	(-0.76,0.28)
20~40	25	固定模型	-0.59	0.270	(-1.63,0.46)
40~60	26	固定模型	-0.70	0.017	(-1.28,-0.12)
60~80	23	随机模型	-0.82	0.010	(-1.44,-0.19)
80~100	25	随机模型	-0.94	0.003	(-1.55,-0.32)
>100	26	随机模型	-0.97	0.002	(-1.57,-0.36)
整体	154	固定模型	-0.69	0.477	(-0.94,-0.44)

表10 灌木建设对土壤水分影响的总体特征

Table 10 Basic characteristics of the impact of shrub planting on soil moisture

土壤深度(cm)	试验数	模型选择	结合效应值	*P*	95%置信区间
0~20	71	固定模型	-0.13	0.454	(-0.46,0.20)
20~40	45	固定模型	-0.30	0.155	(-0.72,0.11)
40~60	43	固定模型	-0.40	0.067	(-0.84,0.03)
60~80	43	固定模型	-0.27	0.211	(-0.70,0.15)
80~100	39	固定模型	-0.28	0.214	(-0.73,0.16)
>100	34	固定模型	-0.34	0.164	(-0.82,0.14)
整体	275	固定模型	-0.27	0.943	(-0.44,-0.10)

表11 建植0~10 a灌木对土壤水分影响的基本特征

Table 11 Basic characteristics of the impact of shrub planting between 0 to 10 years on soil moisture

土壤深度(cm)	试验数	模型选择	结合效应值	*P*	95%置信区间
0~20	19	固定模型	0.08	0.806	(-0.56,0.72)
20~40	14	固定模型	-0.04	0.914	(-0.78,0.70)
40~60	11	固定模型	-0.33	0.444	(-1.18,0.52)
60~80	11	固定模型	-0.04	0.924	(-0.88,0.80)
80~100	9	固定模型	-0.03	0.944	(-0.96,0.89)
>100	10	固定模型	-0.15	0.739	(-1.03,0.73)
整体	74	固定模型	-0.07	0.987	(-0.39,0.26)

表 12　建植 10 ~ 20 a 灌木对土壤水分影响的基本特征
Table 12　Basic characteristics of the impact of shrub planting between 10 to 20 years on soil moisture

土壤深度(cm)	试验数	模型选择	结合效应值	*P*	95%置信区间
0 ~ 20	22	固定模型	-0.39	0.199	(-1.00,0.21)
20 ~ 40	12	固定模型	-0.62	0.148	(-1.46,0.22)
40 ~ 60	12	固定模型	-0.95	0.038	(-1.84,-0.05)
60 ~ 80	15	固定模型	-0.73	0.060	(-1.50,0.03)
80 ~ 100	12	固定模型	-0.56	0.188	(-1.39,0.27)
>100	11	固定模型	-0.46	0.291	(-1.32,0.40)
整体	84	固定模型	-0.59	0.941	(-0.91,-0.27)

表 13　建植 20 a 以上年灌木对土壤水分影响的基本特征
Table 13　Basic characteristics of the impact of shrub planting after 20 years on soil moisture

土壤深度(cm)	试验数	模型选择	结合效应值	*P*	95%置信区间
0 ~ 20	29	固定模型	-0.18	0.489	(-0.70,0.33)
20 ~ 40	18	固定模型	-0.46	0.182	(-1.13,0.21)
40 ~ 60	20	固定模型	-0.40	0.210	(-1.04,0.23)
60 ~ 80	17	固定模型	-0.33	0.347	(-1.01,0.35)
80 ~ 100	18	固定模型	-0.37	0.277	(-1.03,0.30)
>100	13	固定模型	-0.51	0.211	(-1.30,0.29)
整体	115	固定模型	-0.35	0.984	(-0.61,-0.09)

以栽植,按照中国北方降雨量由东向西递减的规律,本文将灌木栽植按降雨量区域(<200、200 ~ 400 mm 地区及>400 mm 地区)分为 3 个区域进行亚组分析。其中涉及降雨量<200 mm 地区灌木栽植的相关文献共有 3 篇(表 2 的 3、11 和 28)(表 14)。通过 Meta 分析(表 14)发现,该区域灌木栽植对 20 ~ 40 cm 的土壤水分含量产生不显著的降低效应,对其他各层土壤水分含量产生增加效应。

表 2 中涉及年降雨量 200 ~ 400 mm 地区灌木栽植的文献共有14篇(2、5 ~ 8、10、12 ~ 16、23、25 和27)。通过 Meta 分析(表15)表明,该区域的灌木栽植使得土壤水分含量降低。其中对 40 ~ 60 cm 的土壤水分含量产生显著的降低作用,对其余各层土壤水分含量的降低作用不显著。

表 14　年降雨量<200 mm 地区灌木对土壤水分影响的基本特征
Table 14　Basic characteristics of the impact of shrub planting on soil moisture in the regions where the precipitation is less than 200 mm

土壤深度(cm)	试验数	模型选择	结合效应值	*P*	95%置信区间
0 ~ 20	13	固定模型	0.05	0.903	(-0.72,0.82)
20 ~ 40	8	随机模型	-0.30	0.559	(-1.29,0.70)
40 ~ 60	8	随机模型	0.52	0.319	(-0.05,1.53)
60 ~ 80	8	固定模型	0.92	0.098	(-0.17,2.01)
80 ~ 100	8	固定模型	0.72	0.177	(-0.33,1.77)
>100	5	固定模型	0.28	0.663	(-0.98,1.53)
整体	50	固定模型	0.31	0.573	(-0.09,0.72)

表 15　年降雨量 200 ~ 400 mm 地区灌木对土壤水分影响的基本特征
Table 15　Basic characteristics of the impact of tree planting on soil moisture in the regions where the precipitation is between 200 to 400 mm

土壤深度(cm)	试验数	模型选择	结合效应值	*P*	95%置信区间
0 ~ 20	34	固定模型	-0.23	0.353	(-0.71,0.25)
20 ~ 40	18	随机模型	-0.65	0.066	(-1.34,0.04)
40 ~ 60	19	随机模型	-0.82	0.020	(-1.51,-0.13)
60 ~ 80	21	随机模型	-0.58	0.072	(-1.21,0.05)
80 ~ 100	16	固定模型	-0.53	0.149	(-1.25,0.19)
>100	16	固定模型	-0.59	0.109	(-1.32,0.13)
整体	124	固定模型	-0.51	0.797	(-0.77,-0.26)

表 16　年降雨量 400 mm 以上地区灌木对土壤水分影响的基本特征
Table 16　Basic characteristics of the impact of shrub plating on soil moisture in the regions where precipitation is more than 400 mm

土壤深度(cm)	试验数	模型选择	结合效应值	*P*	95%置信区间
0 ~ 20	24	固定模型	-0.10	0.742	(-0.66,0.47)
20 ~ 40	29	固定模型	-0.17	0.605	(-0.81,0.47)
40 ~ 60	26	固定模型	-0.46	0.208	(-1.17,0.25)
60 ~ 80	14	固定模型	-0.22	0.565	(-0.96,0.53)
80 ~ 100	15	固定模型	-0.35	0.341	(-1.08,0.37)
>100	13	固定模型	-0.33	0.409	(-1.11,0.45)
整体	121	固定模型	-0.25	0.977	(-0.53,0.03)

表 2 中涉及年降雨量 400 mm 以上地区灌木栽植的相关文献共有 8 篇(4、17 ~ 19、20、24、28 和 32)。通过 Meta 分析(表 16)表明,该区域灌木栽植使得土壤水分含量降低,但影响不显著。

3　讨　论

在中国干旱半干旱地区,植被建设是生态恢复与重建的重要手段之一,其营造过程,除了改变土壤物理、化学和生物学性质外,主要是改变了植被与土壤水分的关系。因此,植被栽植的生态水分后果受到了广泛的关注(赵文智,2002;徐炳成等,2003;Li *et al.*,2004;张志山等,2005;李新荣等,2013)。但在不同地区不同自然条件下,植被建设的方式种类差异较大。中国主要采用乔木和灌木进行植被建设,并得到了大量的研究成果(赵文智,2002;阿拉木萨等,2005;吴祥云等,2004;郑郁等,2013)。本项

目以这些独立研究结果为基础,基于 Meta 分析针对植被建设影响土壤水分的特征进行了统计分析。

人工乔木和灌木植被的建立,造成土壤层的分层开挖、分层堆放、分层回填以及对植被建设区域内草本植物的原生植物破坏,加之植被在生长过程中对水分的利用等,最终导致深层土壤水分含量的变化。本研究发现,人工植被建设对土壤水分含量产生降低效应,其最主要原因是人工林地建设以后,植被的生长需要对水分的需求量增加,这与延军平(2006)的研究一致;而浅层(40 cm 以上)土壤水分含量虽然也会降低,但其降低效应均不显著。主要是因为是随着植被的不断恢复,使得植被建设区域地表其他植被盖度增加,并且有大量枯枝落叶层的积累,可以有效减少地表径流和地表蒸发,增加土壤的入渗和保水能力,进而使得大量水分能够在土壤中储存。但是,由于干旱半干旱地区自然降雨量较低,累积的水分量较少,难以渗透到较深的土壤中,这样就使得浅层土壤中的土壤含水量较高于深层土壤;此外,由于人工植被的建立是以深根性植被替代浅根系植被为主,因此人工植被建立后主要利用较深层的土壤水分,也导致了这种结果的产生(肖洪浪等,2003)。

通过对乔木和灌木对土壤含水量整体结合效应值的比较发现,乔木对土壤含水量的消耗远大于灌木。这与杨海军等(1993)的研究结果一致,即乔木类植物易导致土壤干旱,灌木类次之。我们认为,一方面是因为乔木自身需水量大于灌木;另一方面,不同植被类型的植被对土壤水分的影响差异,还与其建植年限和造林地区的降雨量等相关(徐炳成等,2003)。

通过对不同建植年限的乔木对土壤水分含量影响的亚组分析,建植年限为<20 a 的乔木会对土壤含水量产生显著的降低作用(−0.62),超过 20 a 的乔木对土壤含水量的影响不显著。其原因是幼林在生长期间需水量较大,极大地消耗了植被建设地区土壤水分,而成林后形成成熟的群落结构,具有较大的群落盖度和较多地下枯枝落叶,改变了原有的生态环境,降低了土壤水分的蒸发,从而使土壤水分含量保持较稳定水平。这与姚月锋(2007)的研究是一致的。

不同建植年限灌木对土壤水分含量的亚组分析表明,灌木栽植对土壤水分含量会产生降低效应,但这种降低效应的影响不显著。其中栽植不超过 10 a 的灌木对土壤水分含量的影响最小,栽植超过 20 a 的灌木次之,栽植年限介于10~20 a的灌木对土壤水分含量的影响最大。究其原因,由于幼龄灌木生长旺盛,对水分含量需求较多,灌木对地下水的提升作用较为明显,使得该林龄段灌木林下的土壤水分含量较高;由于长时间对土壤水分的消耗,介于10~20 a的灌木对其栽植地区的地下水大量的提升,间接导致了该地区地下水分含量的急剧下降,进而导致建植 10~20 a 的灌木对土壤水分含量的影响远大于其他林龄段的灌木;超过 20 a 的灌木已经处于稳定结构并且趋于老化阶段,一方面,它们对水分的需求量降低,另一方面,由于灌木林下大量枯枝落叶的堆积和凋落物的覆盖,使得灌木林对土壤水分的涵养能力大为提高(聂雪花,2009;周允安等,2013)。

不同降雨量区域的乔木建设的亚组分析结果显示,不同地区乔木栽植活动均会对土壤水分含量产生降低效应。其中超过 400 mm 降雨量地区的乔木栽植活动对土壤含水量的降低效应更大。这主要是因为降雨量充沛地区的乔木在自然降雨的状况下就可以正常生长,而降雨量小于 400 mm 地区的乔木必须通过人工灌溉等方式方能存活和正常生长,这间接导致了乔木栽植后反而对这些地区的土壤水分含量影响较小。

不同降雨量地区灌木栽植对土壤水分含量的亚组分析结果表明,在降雨量较小的地区(0~200 mm),灌木栽植反而会使得土壤水分含量增加(0.31),主要原因为灌木对地下水的提升作用导致。而降雨量较大地区的灌木栽植对土壤含水量影响不显著,因此,在干旱半干旱地区栽植灌木能够有效促进植被恢复。

与叙述性的综述相比较,Meta 分析可以通过效应值来评价处理的影响,而非依靠综述者的主观认识对事物做出评述和结论。因此,本文的优点就在于将整个中国北方不同降雨量地区以及不同林龄的人工乔木、灌木栽植对土壤含水量的影响量化、客观化,通过综合分析,我们发现,灌木林地土壤水分条件总体好于乔木林地土壤水分条件,乔木栽植易于造成土壤干化等不利于植被恢复的后果,因此在该干旱半干旱地区提倡宜林则林,宜灌则灌,灌木先行的植被恢复措施是必要的。然而,植被建设对土壤水分的影响不仅受到建植年限和降雨量影响,还受到植被建设密度、建设区域土壤环境、空间位置等因

素的影响。因此,更为精细的研究需要在综合现有独立研究结果的基础上,针对现有研究的不足,通过野外调查和采样来完善植被建设对土壤水分影响的数据库,并考虑更多的因子如地形、地质环境、植被建设密度、空间位置等进行亚组分析,在研究的基础上采取最优的植被建设方式。

参考文献

阿拉木萨, 蒋德明, 骆永明, 等. 2005. 半干旱区人工固沙灌丛发育过程土壤水分及水量平衡研究. 水土保持学报, **19**(4): 107-110.

曹成有, 刘世延. 2000. 小叶锦鸡儿人工固沙区植被恢复生态过程的研究. 应用生态学报, **11**(3): 349-354.

曹成有, 蒋德明, 全贵静, 等. 2004. 科尔沁沙地小叶锦鸡儿人工固沙区土壤理化性质的变化. 水土保持学报, **18**(6): 108-112.

陈晓燕. 2010. 大青山前山区主要植被类型土壤水分动态和植被承载力研究(博士学位论文). 呼和浩特: 内蒙古农业大学.

陈云明, 刘国彬, 侯喜录, 等. 2002. 黄土丘陵半干旱区人工沙棘林水土保持和土壤水分生态效益分析. 应用生态学报, **13**(11): 1389-1393.

丛心海, 梁一民, 李代琼, 等. 1990. 黄土高原半干旱区沙棘根系特性与土壤水分动态研究. 水土保持通报, **10**(6): 98-103.

牛俊杰, 赵景波等, 王尚义. 2007. 汾河流域上游人工林地深层土壤干燥化探讨. 地理研究, **26**(4): 773-781.

崔国发. 1998. 固沙林水分平衡与植被建设可适度探讨. 北京林业大学学报, **2**(6): 89-94.

冯金朝, 陈荷生, 康跃虎, 等. 1995. 腾格里沙漠沙坡头地区人工植被蒸耗水与水量平衡的研究. 植物学报, **37**(10): 815-821.

高尚武. 1984. 治沙造林学. 北京: 中国林业出版社.

何志斌, 赵文智. 2003. 半干旱区流沙固定初期不同植被类型的土壤湿度特征. 水土保持学报, **17**(4): 164-167.

胡梦珺, 刘文兆. 2004. 黄土丘陵沟壑区灌木林地土壤水分有效性及盈亏分析. 甘肃省农业科技, (4): 41-45.

贾玉奎, 李钢铁, 董锦兰, 等. 2006. 乌兰布和沙漠固沙林土壤水分变化规律的初步研究. 干旱区资源与环境, **20**(6): 171-174.

李　军, 陈　兵, 李小芳, 等. 2008. 黄土高原不同植被类型区人工林地深层土壤干燥化效应. 生态学报, **28**(4): 129-1445.

李新荣, 马凤云, 龙立群, 等. 2001. 沙坡头地区固沙植被土壤水分动态研究. 中国沙漠, **21**(3): 217-222.

李新荣, 张志山, 黄　磊, 等. 2013. 我国沙区人工植被系统生态-水文过程和互馈机理研究评述. 科学通报, **58**(5-6): 397-410.

刘发民, 金　燕, 张晓军. 2001. 荒漠地区柽柳人工固沙林土壤水分动态研究. 西北植物学报, **21**(5): 937-943.

刘发民, 张应华, 仵彦卿, 等. 2002. 黑河流域荒漠地区梭梭人工林地土壤水分动态研究. 干旱区研究, **19**(1): 27-31.

刘关键, 吴泰相, 康德英. 2003. Meta-分析中的统计学过程. 中国临床康复, **7**(4): 538-539.

刘光祖. 1987. 沙荒区造林树种选择与造林技术试验总结. 甘肃治沙研究所集刊, (2): 23-28.

刘　鸣. 2010. 系统评价、Meta-分析设计与实施方法. 北京: 人民卫生出版社.

刘　讯. 2009. 半干旱黄土高原不同植被恢复和土地利用方式下土壤有机碳、养分和水分的动态变化(博士学位论文). 兰州: 兰州大学.

刘瑛心. 1991. 沙坡头流动沙丘固沙植物引种栽培三十五年. 中国沙漠, **11**(1): 24-31.

刘中奇, 朱清科, 秦　伟, 等. 2010. 半干旱黄土区典型林地土壤水分消耗与补给动态研究. 灌溉排水学报, **29**(3): 36-40.

莫保儒, 蔡国军, 赵廷宁, 等.2009. 甘肃半干旱黄土丘陵沟壑区人工植被土壤水分研究. 水土保持研究, **16**(6): 125-128.

聂雪花. 2009. 祁连山灌木林水源涵养功能的研究(硕士学位论文). 兰州: 甘肃农业大学.

邱丽萍. 2007. 黄土高原植被恢复生态系统土壤质量变化及调控措施(博士学位论文). 杨凌:西北农林科技大学.

邱丽萍, 张兴昌. 2010. 黄土高原沟壑区小流域不同植被覆被对土壤性质的影响. 水土保持研究, **17**(3): 64-68.

山　仑, 邓西平, 苏　佩, 等. 2000. 挖掘作物抗旱节水潜力: 作物对多变低水环境的适应与调节. 中国农业科技导报, **2**(2): 66-77.

沈渭寿. 1999. 毛乌素沙地飞播植被演替的阶段与速度. 林业科学, **35**(3): 103-108.

孙长忠, 黄宝龙. 1998. 黄土高原人工植被与其水分环境相互作用关系研究. 北京林业大学学报, **20**(3): 7-14.

王　博. 2007. 基于水分动态的毛乌素沙地人工固沙植被稳定性评价——以宁夏盐池县为例(博士学位论文). 北京: 北京林业大学.

王　娟, 贺山峰, 邱兰兰, 等. 2009. 科尔沁沙地小叶锦鸡儿群落生长季土壤水分动态和蒸散量估算. 水土保持通报, **9**(6): 103-106.

王　力, 邵明安, 王全九. 2005. 黄土高原子午岭天然林与刺槐人工林地土壤干化状况对比. 西北植物学报, **25**(7): 1279-1286.

王思成, 王月玲, 许　浩, 等. 2009. 半干旱黄土丘陵区不同植被恢复方式下土壤理化特性及相关分析. 西北农业学报, **18**(1): 295-299.

王新平, 康尔泗, 张景光, 等. 2004. 草原化荒漠带人工固沙植丛区土壤水分动态. 水科学进展, **15**(2): 216-222.

王　志, 王　蕾, 刘连友, 等. 2006. 毛乌素沙地沙丘干沙层水分特征初步研究. 干旱区研究, **23**(1): 89-92.

王志强, 刘宝元, 王晓兰. 2005. 黄土高原半干旱区天然锦鸡儿灌丛对土壤水分的影响. 地理研究, **24**(1): 113-120.

王子婷, 于洪波, 莫保儒, 等. 2009. 定西龙滩流域不同人工植被类型土壤水分动态研究. 甘肃林业科技, **34**(1): 14-19.

吴祥云, 姜凤岐, 李晓丹, 等. 2004. 樟子松人工固沙林衰退的规律和原因. 应用生态学报, **15**(12): 2225-2228.
肖洪浪, 李新荣, 段争虎, 等. 2003. 流沙固定过程中土壤-植被系统演变. 中国沙漠, **23**(6): 605-611.
徐炳成, 山 仑, 陈云明. 2003. 黄土高原半干旱区植被建设的土壤水分效应及其影响因素. 中国水土保持科学, **4**(1): 32-35.
许喜民, 陈海滨, 原焕英, 等. 2006. 黄土高原半干旱区人工林地土壤水分环境的研究. 西北林学院学报, **21**(5): 60-64.
延军平. 2006. 秦岭南北环境响应程度比较. 北京: 科学出版社.
杨海军, 孙立达, 余新晓. 1993. 晋西黄土区水土保持林的水分平衡. 北京林业大学学报, **25**(3): 42-50.
杨文治, 韩仕峰. 1985. 黄土丘陵区人工林草地的土壤水分生态环境. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, (2): 18-28.
杨永东. 2008. 黄土丘陵区不同土地利用类型土壤水分动态及水土保持效应研究(硕士学位论文). 兰州: 甘肃农业大学.
杨治平, 张 强, 王永亮, 等. 2010. 晋西北黄土丘陵区小叶锦鸡儿人工灌丛土壤水分动态研究. 中国生态农业学报, **18**(2): 352-355.
姚月锋, 满秀玲. 2007. 毛乌素沙地不同林龄沙柳表层土壤水分空间异质性. 水土保持学报, **21**(1): 111-116.
余新晓, 张建军. 1996. 黄土地区防护林生态系统土壤水分条件的分析与评价. 林业科学, **32**(4): 289-297.
原焕英, 许喜民. 2004. 黄土高原半干旱丘陵沟壑区人工林土壤水分动态研究. 西北林学院学报, **19**(2): 5-8.
原焕英. 2004. 黄土高原半干旱区主要造林树种水分消耗规律研究(硕士学位论文). 杨凌: 西北农林科技大学.
张建军, 李慧敏, 徐佳佳. 2011. 黄土高原水土保持林对土壤水分的影响. 生态学报, **31**(23): 7056-7066.
张雷明, 上官周平. 2002. 黄土高原土壤水分与植被生产力的关系. 干旱区研究, **19**(4): 59-63.
张志山, 张景光, 刘立超, 等. 2005. 沙漠人工植被降水截留特征研究. 冰川冻土, **27**(5): 761-766.
赵文智. 2002. 科尔沁沙地人工植被对土壤水分异质性的影响. 土壤学报, (1): 113-119.
郑 郁, 张 霞, 辛向文, 等. 2013. 陕北地区不同纬度带人工刺槐林土壤水分特征研究. 水土保持研究, **20**(4): 8-12.
周允安, 黄承标, 曾戍秀, 等. 2013. 不同人工林类型枯枝落叶层及土壤层水源涵养功能分析. 广东农业科学, (14): 85-91.
Begg CB. 1994. Publication bias// Cooper H, Hedges LV, eds. The Handbook of Research Synthesis. New York: Russell Sage Foundation: 399-409.
Cooper H, Hedges LV. 1994. The Handbook of Research Synthesis. New York: Russell Sage Foundation.
Curtis P, Wang XZ. 1998. A meta-analysis of elevated CO_2 effects on woody plant mass, form and physiology. *Oecologia*, **113**: 299-313.
Gurevitch J, Hedges LV. 1993. Meta-Analysis: Combining the Results of Independent Experiments. New York: Chapman and Hall.
Johnson DW, Curtis P. 2001. Effects of forest management on soil C and N storage: Meta analysis. *Forest Ecology and Management*, **140**: 227-238.
Li XR, Ma FY, Xiao HL, *et al*. 2004. Long-term effects of revegetation on soil water content of sand dunes in arid region of Northern China. *Journal of Arid Environments*, **57**: 1-16.
Noble GH. 2006. Meta-analysis: Methods, strengths, weaknesses, and political uses. *Laboratory and Clinical Medicine*, **147**: 7-20.
Peterson AG, Ball JT, Luo Y, *et al*. 1999. The photosynthesis-leaf nitrogen relationship at ambient and elevated atmospheric carbon dioxide: A meta-analysis. *Global Change Biology*, **5**: 331-346.
Rosenthal R, Dimatteo MR. 2001. Meta-analysis: Recent developments in quantitative methods for literature review. *Annual Review of Psychology*, **52**: 59-82
Scheiner SM, Samuel M, Gurevitch J, *et al*. 1993. Design and Analysis of Ecological Experiments. New York: Chapman and Hall.
Wang XP, Berndtsson R, Li XR, *et al*. 2004. Water balance change for a revegetated xerophyte shrub area. *Hydrological Sciences Journal*, **49**: 283-295.

作者简介 李 刚,男,1986年生,硕士研究生,主要研究方向为干旱区生态恢复。E-mail: ligang6611@lzb.ac.cn
责任编辑 张 敏