

DOI: 10.5846/stxb201508271781

鲁晨曦,曹世雄,石小亮.我国北方干旱半干旱地区人工造林对地下水位变化影响的模拟研究.生态学报,2017,37(3): - .

Lu C X, Cao S X, Shi X L. Stimulation on the impact of afforestation on the groundwater table in arid and semi-arid areas in northern China. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(3): - .

我国北方干旱半干旱地区人工造林对地下水位变化影响的模拟研究

鲁晨曦^{1,2}, 曹世雄^{2,*}, 石小亮^{3,4}

1 清华大学地球系统与科学研究中心, 北京 100084

2 北京林业大学经济管理学院, 北京 100083

3 沈阳农业大学经济管理学院, 沈阳 110866

4 中国环境科学研究院, 北京 100012

摘要:水资源短缺已成为阻碍我国社会可持续发展的至关因素,而其中地下水资源短缺更甚。自 1952 年我国于干旱半干旱地区实施大规模人工造林以来,大量研究资料显示人工林的蒸散量要普遍高于当地自然植被的蒸散量,这可能会打破当地的地下水水平衡。而以往我国有关人工造林对地下水位影响的研究较欠缺,因此在基于两种假设条件下,运用 7 种蒸散发模型测算了人工造林活动对北方干旱半干旱地区的地下水位影响。结果表明大规模的人工造林活动会降低地下水位高度,基于假设条件一,甘肃、宁夏和新疆地下水位下降严重;基于假设条件二,北京地下水位下降明显。提出我国在未来生态修复实践中要考虑对地下水供给的影响,确定合理造林规模并选择栽培乡土树种,真正提高地下水资源利用率。

关键词:人工造林;干旱半干旱地区;蒸散量;地下水位;乡土树种;造林规模

Stimulation on the impact of afforestation on the groundwater table in arid and semi-arid areas in northern China

LU Chenxi^{1,2}, CAO Shixiong^{2,*}, SHI Xiaoliang^{3,4}

1 Center for Earth System Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China

2 College of Economic Management, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

3 College of Economics and Management, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China

4 Chinese Research Academy of Environmental Science, Beijing 100012, China

Abstract: Water scarcity is a global environmental problem that jeopardizes human safety and socioeconomic development. In China, it has also become a potentially major obstacle for socioeconomic development, where 164 major groundwater areas are being exploited unsustainably. As a result, the depth of the groundwater table has increased by an average of 1.5 m per year in the arid and semi-arid regions of the north. Since 1952, China has implemented an unprecedented large-scale tree-planting program that focused on arid and semi-arid regions. The goal was to use trees to conserve water and combat desertification. Unfortunately, there is a serious risk that this program could exacerbate water shortages and lower the groundwater table because the trees were not chosen based on local environmental constraints, and their evapotranspiration is greater than the regional precipitation. Since precipitation is the major source of groundwater recharge in these semi-arid and arid areas of northern China, this imbalance will intensify the decline of the groundwater resource. Despite this risk,

基金项目:国家社科基金重大项目(11&ZD042)

收稿日期:2015-08-27; 网络出版日期:2016-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shixiongcao@126.com

there has been limited research on the effect of afforestation on the groundwater table in China. In the present study, we selected nine provinces and provincial-level regions (Beijing, Hebei, Henan, Shanxi, Shaanxi, Ningxia, Inner Mongolia, Gansu, and Xinjiang) in China that focused on the tree-planting program, and are environmentally fragile arid or semi-arid regions facing a serious water scarcity. We calculated the influence of the afforestation program on groundwater based on two assumptions using seven evapotranspiration models, without considering evapotranspiration of the underlying vegetation or accounting for differences among the tree species used in afforestation. We confirmed that there is a serious risk that afforestation will cause the groundwater table to decline, independent of any other human withdrawals of this water. Based on our assumptions that afforestation plots had insignificant groundwater recharge or losses as a result of lateral inputs from adjacent land via subsurface or surface flows and that all planted trees survived, the groundwater table would decline most dramatically in Gansu, Ningxia, and Xinjiang regions. When we extended our analysis to assume that groundwater exchanges would possibly occur in land adjacent to the afforestation plots, and that this recharge is affected by the distance between the two plots, we found that the groundwater table in Beijing decreased most. Together, our results suggest that implementing such an afforestation program in arid and semi-arid areas without considering its influence on the groundwater supply will cause potentially severe damage to local ecosystems. In China, this will possibly compromise the goals of the national environmental policy, and damaging local socioeconomic conditions. In contrast, acknowledging the effects of this program will support efforts to utilize groundwater resources more efficiently, decrease the impact on the ecological services provided by these regions, and will mitigate the social and economic impacts on residents in these regions. In planning future ecological restoration practices, the impacts on the groundwater resource must be considered and calculated. In particular, environmental managers should select native tree species with high water-use efficiency and consider alternatives to trees, such as shrubs, sub-shrubs, and grassland or steppe vegetation. In addition, a broader variety of trees and other plant types should be considered; to determine an appropriate scale for afforestation that accounts for local moisture conditions, and determine methods to utilize the groundwater resource more efficiently and sustainably. This afforestation approach will improve the successful ecological restoration and sustainability of arid and semi-arid regions in China.

Key Words: afforestation; arid and semi-arid areas; evapotranspiration; groundwater supply; natural tree species; afforestation

地下水是指在地表以下各种形式的重力水,它作为水资源的重要组成部分对生物生存和人类生产活动都具有重要意义^[1]。由于地下水补给稳定且分布广泛,因此在社会经济发展、人类生存以及生态系统中有着不可替代的作用,尤其是在干旱和半干旱地区^[1]。71%的城市将开采的地下水作为社会经济活动的主要水源,90%以上用于生活和工业活动的水来自地下水^[2]。在经济飞速增长的同时,水资源短缺已成为限制我国经济社会可持续发展的主要因素^[3];在这种严峻形势下,开采地下水在一定程度上会缓解我国水资源的巨大需求,特别是在北方地区。在未来,鉴于大量的水资源需求,地下水在经济社会发展中会日益发挥重要的作用。虽然如此,地下水资源却处于尴尬境地。根据调查,全国有164个地下水超采区,北方干旱和半干旱地区地下水位以每年1.5m的速度下降。例如,北京城区地下水位从1965年以来已经下降了65m^[4],虽然地下水资源的减少是由包括降水季节性变化、景观和人类活动(工业生产和农业灌溉)等在内的诸多因素造成的^[2],然而在这些因素中,研究学者们忽略了生态修复活动对其产生影响。

为缓解由于快速经济发展产生的生态环境问题,我国已经斥巨资实施世界上规模最大的人工造林计划——全球三分之一的人工林目前种植在我国^[5-6],而大多数造林工程在我国北方干旱和半干旱地区实施,以缓解荒漠化和控制沙尘暴^[7-9]。根据第八次全国森林资源清查结果显示^[10],我国人工林总面积为 $6933 \times 10^4 \text{hm}^2$,而造林政策实施的目标是到2050年使森林覆盖率增加到26%以上^[5]。众所周知,森林具有改善区域水环境^[11]和提供额外生态系统服务^[12]的潜在功能,如防风固沙、调节气候和减少污染^[13,14]。然而,这些潜

在功能能否实现有必要进行深入探讨或探究^[15-16]。

造林政策实施者倾向于生长快速、生命周期短、能迅速提供短期收益的树木或灌木,而不是进行周期长,见效缓慢的自然修复,因为林地更新通常需要一个世纪甚至更长时间^[17]。地区植被承载能力主要取决于降水量,然而北方多数实施项目和当地水文、土壤、气候和地形条件不适应^[15-16]。种植在干旱和半干旱区的树木蒸散量超过了小盐生亚灌木、草原等天然植被,如胡杨是干旱地区广泛种植树种,用来代替农田、固沙和提供其他生态功能^[18],实验表明 8 年生杨树林的蒸散量大于同一时期的降水量^[19]。由此不难想象,在干旱和半干旱地区,本身需消耗大量水的树木或灌木必然会吸收深层土壤水来生存。然而,过程如不能及时得到降水或径流补给会导致地下水位下降。当地下水位下降到一定水平下,浅根性植物将无法生存^[15,20],且多数浅根性植物是自然植被^[19,21]。当自然植被退化而不能拦截地表径流时,会加剧当地水资源赤字并会引起起沙尘暴和水土流失的生态问题,进一步导致地下水的减少、造林死亡率的增加^[11,14,22-23]。在全球气候变化背景下,由于气温升高和植被蒸散量的加大,干旱和半干旱造林区变得更易遭受旱灾,使地下水位下降更为严重。当地下水下降超过临界点,也将会威胁到其他生态系统组成部分。因此没有审查和科学的论证以及没有考虑生态条件的人工造林项目,可能会加剧水资源短缺和地下水减少,提高相关的生态和经济成本,这对整个生态系统包括造林失败、持续退化和社会经济发展的演替变化都有巨大影响。

国际上,学者针对不同造林区的不同树种对地下水补给进行了研究,如 Allen 和 Chapman^[24]通过对冰岛造林区域的研究表明,由于人工林大量吸收土壤水以及土壤保水能力的增强,草原或荒原的地下水补给率会减少 1/10,且由于地下水补给率的降低使地下水水质污染的体现滞后,Salm et al^[25]基于水文 SWAP 模型,对前耕地上的橡树和云杉的水平衡和氮预算研究,发现 18 年生的橡树和 13-14 年生的云杉分别会导致地下水补给每年下降约 485mm、100mm。然而,国内研究还没有关注大规模人工造林对地下水的影响。因此本研究不仅有利于了解我国规模巨大的人工造林工程对地下水资源造成的潜在影响,促进生态修复工程的资源节约及可持续,且可填补国内该研究的空白。根据国际上定义,人工林潜在蒸散量与降水量的比值大于 1 为干旱半干旱地区,因此根据该定义的测算结果,本研究选取以下 9 个省市自治区作为研究对象——北京、河北、河南、山西、陕西、宁夏、内蒙古、甘肃、新疆。利用已公布国际上通用的 7 种蒸散发模型来测算人工林的蒸散量。

1 研究方法

由于技术的受限以及数据的可获得性,仅考虑人工林植被对地下水的影响,不考虑下垫面对地下水的影响,如灌木草地等,对人工林的植被类型也不加区分。为便于计算,假设自然降水仅供植物蒸腾作用和地下水循环使用。从国家气象局发布的气象年鉴^[26]中搜集了从 1952 到 2011 年的降水量,从国家林业局出版的林业年鉴^[27]中搜集了 9 个省市自治区 1952—2011 年的造林面积的相关数据。通过 7 种蒸散模型来计算各省造林区的年均水消耗量,从相关文献中(见表 1)获得 9 省的土壤孔隙度。

1.1 关于 7 种蒸散发模型说明

(1) ANN (Artificial Neural Networks) 人工神经网络模型

ANN 是一种模仿人类大脑神经元特性和人脑认知功能构造的处理非线性知识信息的方法,该模型由三层构成:输入层、隐含层、输出层^[28]。ANN 通过训练数据调整内部节点的权重以及充分考虑训练网络的复杂性,使其能够代表任何一种非线性函数。当输入样本较杂乱甚至有部分数据丢失时,ANN 可根据数据子集概括出相对精确的关系,且可适应模拟环境变化^[29]。

ANN 已在人工智能、模式识别、信号处理和自动控制等众多研究领域取得了令人瞩目的成果,正被越来越多地应用于蒸散发模型中^[30]。该研究使用的是 Rumelhart 等人 1986 年^[31]发明的反向传播神经网络找到最合适的训练数据,然后利用被广泛使用的多层感知器 (MLP) 神经网络将隐含层和输出层相连。

(2) SVM (Support Vector Machines) 支持向量模型

SVM 是 Vapnik 等人 1998^[32]年首先提出的一种监督学习方法,并且被广泛应用于统计分类以及回归分

析。SVM 回归的求解方法是通过一个非线性映射,将数据映射到高维特征空间,在这个空间进行线性回归,从而解决线性支持向量回归问题,即可推广至非线性回归。SVM 的最优回归方程为:

$$f(x) = \sum_{k=1}^{N_{SV}} \alpha_k K(x_k, x) + b$$

式中: $f(x)$ 为在误差允许范围内的输出值; N_{SV} 为支持向量的数量; α_k 为拉格朗日因子; $K(x_k, x)$ 为核函数; b 为变差。

对非线性回归可通过该函数将样本映射到一个高维特征空间中用线性回归来解决。在以往研究中,SVM 已被用来估算很多因子如风速^[33]、降雨^[34]、生态位^[35]以及蒸散量^[36]等。

(3) RT(Regression Trees) 回归树模型

RT 的基本原理是根据响应变量,利用循环二分形成二叉树形式的决策树结构,将由预测变量定义的空间划分为尽可能同质类别^[37]。预测变量被从主节点中逐次划分为一系列等级结构的左节点和右节点,每个节点处列出了落在该部分的预测变量的均值(MEAN)、方差(SD)及样本数(N)。回归树模型在每个根节点处均可标出消减错误比例的数值,即任何一个分类参数对因变量变异的贡献程度。一般位于第一级节点处的分类参数对因变量变异贡献最大。在该研究中,使用 Cubist (RuleQuest Research, Pty Ltd Company, 30 Athena Avenue, St Ives NSW 2075, Australia) 回归树模型进行计算^[38]。

(4) Reg1 模型

Reg1 模型是 Wang 等人 2007 年^[39]提出的一种估算蒸散量方法,其控制变量为 R_n 、 T 、 VI 。Reg1 的公式为:

$$ET = R_n \cdot (a_0 + a_1 \cdot VI + a_2 \cdot T)$$

式中, VI 可以是增强型植被指数 (Enhanced Vegetation Index; EVI),也可以是归一化植被指数 (Normalized Differential Vegetation Index; NDVI); R_n 为地面净辐射; T 则可以为日平均气温、日最高气温或者是陆地表面温度 T_s ; a_0 、 a_1 、 a_2 为参数。

(5) Reg2 模型

Reg2 模型将 ET 分为两个部分:一个是 ET_E ;另一个是 ET_A ^[40]。Reg2 模型估算蒸散量的公式为:

$$ET_E = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot R_s \cdot [a_1 + a_2 \cdot NDVI + RHD \cdot (a_3 + a_4 \cdot NDVI)]$$

$$ET_A = \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \cdot WS \cdot VPD \cdot [a_5 + RHD \cdot (a_6 + a_7 \cdot NDVI)]$$

$$ET = a_8 \cdot (ET_E + ET_A) + a_9 \cdot (ET_A + ET_E)^2$$

式中, ET 为总蒸散量; ET_E 为能量为主要影响的蒸散量; ET_A 为气压控制为主的蒸散量; Δ 为饱和水汽压—温度曲线上的斜率 (KPa/°C); γ 为湿度计常数 (KPa/°C); R_s 为到达地面的总辐射;NDVI 归一化植被指数;RHD 相对湿度, $RHD = 1 - RH/100$, RH 为相对湿度 (Relative Humidity); WS 为风速 (Wind Speed, m/s); VPD 为饱和蒸汽压亏缺 (vapor pressure deficit); a_1 、 a_2 ... a_9 为参数。

(6) RRS-PM (Revised Remote Sensing-Penman Monteith) 模型

RRS-PM 模型是 Yuan 等人 2010 年在 RS-PM 模型基础上改进后的新模型^[41],同样基于 Penman—Monteith 方程:

$$\lambda E = \frac{sA + \left(\frac{\rho C_p D_a}{R_a}\right)}{s + \gamma(1 + R_s/R_a)}$$

式中, λE 为潜热通量 (w/m^2), λ 为汽化潜热 (KJ/kg); s 为饱和水汽压—温度曲线上的斜率 (KPa/°C); A 表示在显热通量、潜热通量和土壤不同区间的可利用能量; ρ 为空气密度; C_p 为空气比热 [$J/(kg \cdot K)$]; γ 为湿度计常数 (KPa/°C); R_a 为气动阻力系数; R_s 为表面阻力系数; D_a 为空气的饱和水汽压和实际水汽压的差值。

(7) PT-JPL 模型

Fisher 等人 2008 年对 Priestley-Taylor 模型做出适当改进后提出 PT-JPL 蒸散量模型^[42], 公式为:

$$E = E_s + E_c + E_l$$

$$E_c = (1 - f_{wet}) \cdot f_g \cdot f_T \cdot f_M \cdot \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_{nc}$$

$$E_s = (f_{wet} + f_{SM} \cdot (1 - f_{wet})) \cdot \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_{ns} - G)$$

$$E_l = f_{wet} \cdot \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \cdot R_{ns}$$

式中, E 为蒸发蒸腾损失总量; E_s 为土壤蒸发量; E_c 为植被蒸腾量; E_l 为冠层截留水分蒸发量; R_{nc} 为冠层的净辐射量; R_{ns} 为土壤表面净辐射量; f_{wet} 为表层相对湿度; f_g 为绿冠层覆盖度; f_T 为植被温度约束; f_M 为植被水分约束; Δ 为饱和水汽压—温度曲线上的斜率 (KPa/°C); γ 为湿度计常数 (KPa/°C); $\alpha = 1.26$

1.2 具体模拟测试方法

(1) 为了解人工造林对地下水的影响, 假设造林区是相对封闭区, 不存在地下水之间的相互补给。基于人工造林的蒸散量 (E)、降水量 (P) 和土壤孔隙率 (S), 估计了每年累计每省市自治区人工造林对地下水位变化 (G) 的影响:

$$Gitm = \frac{\sum (Pit - Eaim)}{Si} (Gitm < 0) \quad (1)$$

在模型 m 中, $Gitm$ 是各省市自治区 (i) 每年 (t) 由人工造林所引起的累计地下水位变化; $Eaim$ 是各省市自治区 (i) 人工林蒸散量; $Pit(m)$ 是各省市自治区 (i) 每年 (t) 的降水量。

(2) 实际上, 地下水之间是会相互进行补给的, 但补给受地域限制, 而人工造林存活率往往较低。因此, 假设地下水的相互补给在同一省份内进行没有省际间补给, 且考虑林地存活率, 以大致估算人工造林活动造成各省市自治区地下水位实际的变化量。实际估测各省 (直辖市、自治区) 每年造林对地下水位变化的模型如下:

$$Agitm = \frac{Gitm}{7} * \frac{\sum (Ait * Rit)}{Li} (Agitm < 0) \quad (2)$$

$Agitm(m)$ 是在模型 m 中各省 (直辖市、自治区) (i) 每年 (t) 由人工造林而导致的实际地下水位变化; Ait (ha) 是各省 (直辖市、自治区) (i) 每年 (t) 的造林面积; Rit (%) 是各省市自治区 (i) 每年 (t) 的树木存活率^[43], Li 是各省市自治区的 (i) 土地面积。

表 1 北方九省市自治区的土壤孔隙度

Table 1 The soil porosity of nine provinces in northern China

省份 Province	土壤孔隙度/% Soil porosity	树木存活率/% Survival rate of trees	省份 Province	土壤孔隙度/% Soil porosity	树木存活率/% Survival rate of trees
北京	57.69 ^[44]	34	河北	54.07 ^[45]	16
河南	37.50 ^[46]	30	山西	45.70 ^[47]	7
陕西	58.37 ^[48]	15	甘肃	56.00 ^[49]	9
宁夏	54.74 ^[50]	5	新疆	62.60 ^[51]	15
内蒙古	48.50 ^[52]	14			

2 结果分析

在假设地区的地下水不相互流通以及没有径流的补给的情况下, 研究表明, 造林区的地下水位会随

着造林面积的逐年增加而不断下降。7种模型均值测算结果为60年后,陕西和新疆的地下水位分别下降了21.5m和40m(图1)。

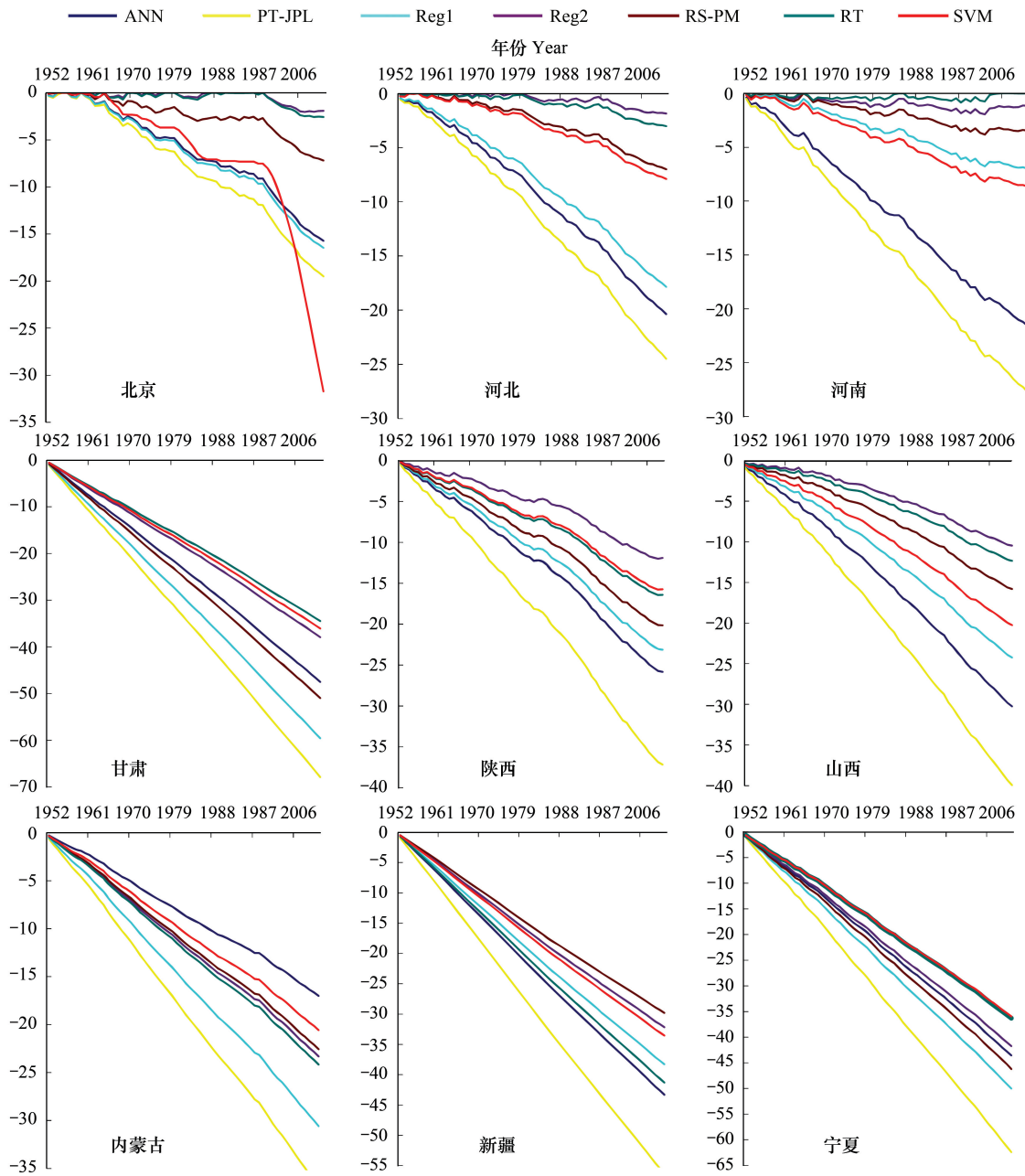


图1 1952—2011年我国北方干旱半干旱地区地下水位模拟变化图(m)

Fig.1 Potential groundwater decline in arid and semi-arid areas in northern China from 1952 to 2011

当某个地区的地下水位下降时,地势高的地下水会流到该地区进行补给,所以实际的地下水位变化与基于封闭地区(即方法一)的测算结果是不一样的。如图1显示,陕西的地下水位大约下降2m,新疆约下降0.2m。但基于方法二,北京地下水下降最为严重近3m(图2)。由于人工造林活动使得水供给形势变得更加严峻,这样将增加额外的水成本如投资在水资源重复利用成本,调水成本以及其他途径节约用水、开采水资源以及处理生态环境问题的成本。

以上两种假设条件测算结果表明,随着大规模人工造林活动的实施,地下水位有不断下降的趋势。

3 讨论

研究测算结果表明人工造林对地下水位变化的影响不能忽视。我国人工造林取得了如控制土壤侵蚀和退化等成效^[7-9]。但由于中央控制政策、部门间相互妥协以及短期考虑,造林政策实施者常选择生产迅速的树种作为造林种^[53]。而在相同生态条件下,快速增长和短期生长的森林或者灌木总是会比天然植被蒸腾更多水分,因此,在干旱和半干旱地区大规模植树造林时,由于该地区原本蒸发旺盛,水资源消耗(蒸散、人类生产活动等)和水供给(降水)之间的矛盾也将被激化。后果是土壤水分会降低,而地下水位会降低到使根部细小的天然草地和草原难以生存。此外,伴随原生植被破坏,荒漠化也会随之而来^[15]。图 1 显示,如果地下水得不到充分补给,在新疆地区,根据七种模型平均值测算得到的地下水位将降低 40m,这不仅将导致造林失败,且使当地采水产生困难。可见,在干旱半干旱地区进行人工造林如果忽略其对地下水资源的影响,将给当地生态系统带来致命影响,生态修复的目标难以达到,且会恶化生产生活条件。

由图 2 可以看出,造林对地下水位变化影响最严重为北京,在考虑地下水补给条件下,北京市地下水位已降低 3m。实际上,由于农业、工业生产活动和人类生活对地下水的开采,土地之间几乎已经没有相互的地下水补给。如在全年降水量减少和人口急剧增加情况下,北京作为水资源最短缺地区,地下水平均开采率为 103.7%^[54]。为确保北京市充足的水供应,政府为此付出了沉重代价。自 2001 年来,为保护水资源,在山西、河北、北京等省市推出 21 世纪初期首都水资源可持续利用规划,总投资达 220 亿人民币^[55],且为确保北京市的水安全,北京市周边地区付出了巨大代价,承德市从 1996 年到 2005 年农作物减产产量达 3×10^4 t,合计亏损 400 亿人民币(平均每人亏损 1084 元)^[31],且作为北京郊区水源保护区,其 GDP 维持在较低水平。因此认识到人工造林对地下水资源的消耗,将促进对地下水资源的高效率利用,节约水资源,减少经济代价。

4 建议

首先,地下水深度反映了消耗(蒸散、人类消耗、流出)和补给(降水及来自高海拔流量)之间的平衡。因为所有的生态组成部分相互影响,所以复杂的生态系统需要综合考虑水的输入和输出问题。因此,政策制定者和科学家有责任根据当地气候条件、水文、土壤等因素进行深入调查和取证,从而实现长期、有效的生态修复^[56]。为达到长期可持续生态修复目标,应尊重当地的生态条件且权衡生态和社会效益。与目前大面积造林普遍使用的杨树、刺槐、落叶松、油松等树种相比,乡土树种由于对当地的气候、水文、地理条件较适应,蒸散量明显较小,尤其是在北方干旱半干旱地区对地下水资源的保护有积极作用。为作好人工造林更新工作,首先要适地适树,在造林树种的选择上尽量选择当地乡土树种,加强造林管护工作,及时抚育,促进森林资源的可持续发展和维护生态系统的多样性(表 2)。

第二,管理者应该限制造林规模来缓解由造林和地下水位下降之间造成的用水矛盾,即便造林不是造成地下水位下降的主要原因。通过搜集北京市、河北省等 9 个省市自治区 1952—2011 年的每年降水量数据,对各省、市、自治区每年降水量和该省市自治区长期以来的平均降水量比较^[64],正值代表湿润趋势,负值代表干旱

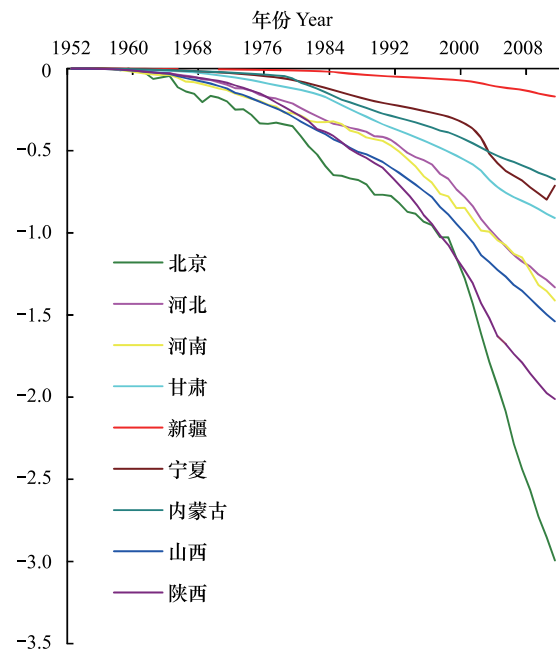


图 2 1952—2011 年我国北方干旱半干旱地区实际地下水位模拟变化图/(m)

Fig.2 Actual groundwater decline in arid and semi-arid areas in northern China from 1952 to 2011

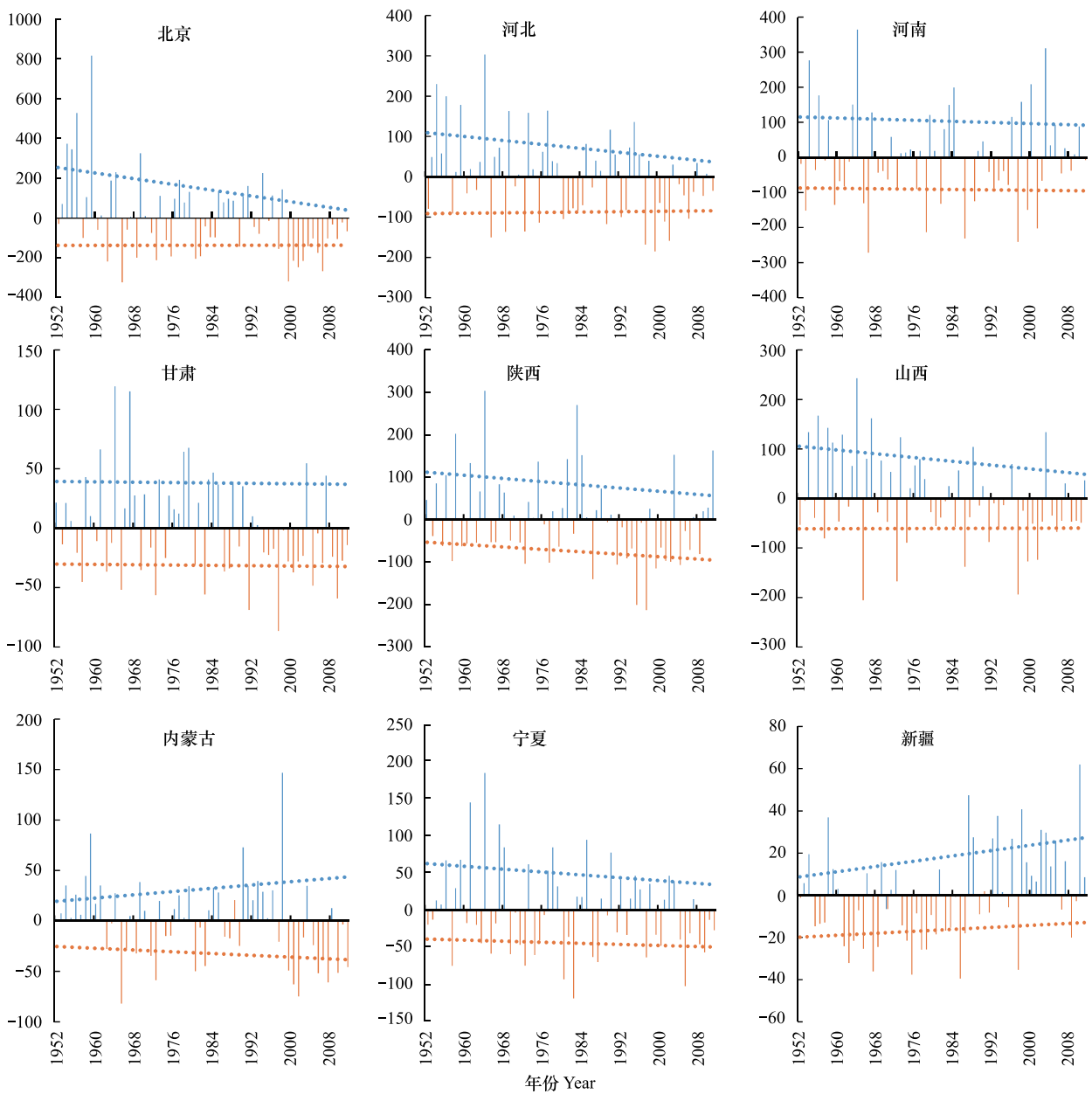


图3 1952—2011年我国北方干旱半干旱地区的气候干湿变化趋势

Fig.3 The trend of climate change in arid and semi-arid areas in northern China from 1952 to 2011

趋势,并将比较结果进行回归,得到9个省市自治区气候干湿变化趋势图(图3)。通过1952—2011年各省市自治区的平均水资源总量和用水总量的对比^[64],了解到北京市、河北以及宁夏处于极度缺水的状态,水资源总量已不能满足用水需求。河南、内蒙古、山西以及甘肃的水资源总量基本能够满足正常用水需求。陕西和新疆的水资源总量相对丰富,除可满足正常用水外,还有大量富余的水资源。综上分析,河南、内蒙古、山西、陕西、甘肃这五个地区都处于水资源相对充足,但当地相对湿度降低的状态,因此,在这类地区开展造林活动时,应该注意控制好造林规模,做好合理规划与布局,同时注重生态系统的自我修复,从而减缓或改善气候变干旱的形势。而北京、河北和宁夏处于本身水资源不能满足用水需求的状态,且气候变化趋势显示会更加干旱,因此在缺水且干旱地区,大规模植树造林活动已不再适合当地自然条件,即便实施造林活动,造林成活率也会很低,因此应以自然植被修复为主,同时加强水资源管理,提高水资源利用效率(表3)。

表 2 我国北方九省的常见乡土树种

Table 2 Natural tree species in nine provinces in northern China

省份 Province	乡土树种 Natural tree species
北京	悬铃木属 <i>Platanus</i> L.、栓皮栎 <i>Quercus variabilis</i> 、银杏 <i>Ginkgo biloba</i> 、毛白杨 <i>Populus tomentosa</i> 、槐 <i>Sophora japonica</i> 、西府海棠 <i>Malus micromalus</i> 、垂柳 <i>Salix babylonica</i> 、栎树 <i>Koelreuteria paniculata</i> 、五角枫 <i>Acer mono</i>
河南	梧桐属 <i>Firmiana</i> Marsigli、河南猕猴桃 <i>Actinidia henanensis</i> C.F.Liang、柿 <i>Diospyros kaki</i> L.f.、杨属 <i>Populus</i> L.
河北	苹果 <i>Malus pumila</i> 、栗 <i>Castanea mollissima</i> 、杨属 <i>Populus</i> L.、柳属 <i>Salix</i> L.、洋槐属 <i>Robinia</i> L.
内蒙古	木贼属 <i>Equisetum</i> L.、油松 <i>Pinus tabulaeformis</i> 、榛属 <i>Corylus</i> L.
陕西	杨属 <i>Populus</i> L.、胡桃属 <i>Juglans</i> L.、陕西荚蒾 <i>Viburnum schensianum</i> Maxim.
山西	华北落叶松 <i>Larix principis-rupprechtii</i> 、大叶榆 <i>Ulmus laciniata</i> 、枣 <i>Ziziphus jujuba</i> 、李 <i>Prunus salicina</i> 、胡桃属 <i>Juglans</i> L.
宁夏	旱柳 <i>Salix matsudana</i> 、云杉属 <i>Picea</i> Dietr.
甘肃	沙枣 <i>Elaeagnus angustifolia</i> 、麻栎 <i>Quercus acutissima</i> 、文冠果 <i>Xanthoceras sorbifolia</i>
新疆	胡杨 <i>Populus euphratica</i> 、怪柳 <i>Tamarix chinensis</i> 、梭梭 <i>Haloxylon ammodendron</i>

数据来源:见参考文献[57-63].

表 3 我国北方干旱半干旱地区的造林规模建议

Table 3 Suggestions to the scale of afforestation in arid and semi-arid areas in northern China

地区水资源丰富程度 Regional water-rich degree	地区气候干湿变化 Regional climatic change	地区分类 Area classification	造林规模 Scale of afforestation
充足 Sufficient	干旱趋势	河南、内蒙古、陕西、山西、甘肃	控制
充足 Sufficient	湿润趋势	新疆	保持
不足 Insufficient	干旱趋势	北京、河北、宁夏	减少,以自然修复为主
不足 Insufficient	湿润趋势	—	—

第三,考虑到地下水在动植物生存生长和人类活动中的重要地位,尤其在生态条件脆弱地区。因此,通过区域地下水资源调查与评价,制定优化的地下水开采方案是关键。通过征收适度水费和制定相关法律法规的方式来限制地下水的开采,提高地下水利用效率,而不是试图增加水资源供给。

5 结语

本研究侧重测算人工造林对地下水位变化的影响,因此忽略了其他因素对地下水位的影响,同时本研究是大尺度研究,因此本文的假设并不十分贴近实际,因此在以后的研究中需要进一步细化模型,加进更多的影响变量以提高模型的精度或改善研究方法,同时伴随今后遥感精度的提高,获得数据的精确性会更高。

参考文献 (References):

- [1] 闫琪.地下水资源的刑法保护研究.辽宁:辽宁大学,2013.
- [2] 王玉平,刘金武.中国地下水资源合理开发利用研究.石家庄经济学院学报,2000,(2):199-210.
- [3] 王瑗,盛连喜,李科,孙弘颜.中国水资源现状分析与可持续发展对策研究.水资源与水工程学报,2008,19(3):10-14.
- [4] 李业.中国地下水位不断下降将引起世界粮食价格的上.中国税务,2000,(8):60-61.
- [5] Wang G, Innes J L, Lei J, Dai S, Wu S W. China's forestry reforms. Science, 2007, 318: 1556-1557.
- [6] Singh K D. Global forest resources assessments//Capacity building for the planning, assessment and systematic observations of forests. Springer Berlin Heidelberg, 2013:203-211.
- [7] 李瑞林,胡培兴,张相辅,董建林.“六大工程”系列报道之一 绿色为京津撑起防沙“伞”——环北京地区防沙治沙工程访谈.森林与人类, 2001,(9):14-18.
- [8] Yang H. Land conservation campaign in China: integrated management, local participation and food supply options. Geoforum, 2004, 35:507-518.
- [9] Liu J, Li S, Ouyang Z, Tam C, Chen X. Ecological and socioeconomic effects of China's policies for ecosystem services. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2008, 105:9477-9482.
- [10] 国家林业局.第八次森林资源清查结果报告.北京:中国林业出版社,2013.
- [11] Ellison D, Futter M N, Bishop K. On the forest cover-water yield debate: from demand-to supply-side thinking. Global Change Biology, 2012, 18:

806-820.

- [12] Molle F, Berkoff J. Cities vs. agriculture: a review of intersectoral water re-allocation. *Nature Resource Forum*, 2009, 33: 6-18.
- [13] Dou J, Wang X, Xiong W. Study on soil capacities of water-retention on typical vegetations in the north side of Liupan Mountains in Ningxia. *Forest Research*, 2006, 19: 301-306.
- [14] Wang S, Fu B, He C, Sun G, Gao G. A comparative analysis of forest cover and catchment water yield relationships in northern China. *Forest Ecology and Management*, 2011, 262: 1189-1198.
- [15] Cao S, Sun G, Zhang Z, Chen L, Feng Q, Fu B, McNulty S, Shankman D, Tang J, Wang Y, Wei X. Greening China Naturally. *Ambio*, 2011, 40: 828-831.
- [16] Wang X, Zhang C, Hasi E, Dong Z. Three Norths Forest Shelterbelt Program solved the desertification and dust storm problems in arid and semiarid China? *Journal of Arid Environments*, 2010, 74: 13-22.
- [17] Chazdon R L. Beyond deforestation: restoring forests and ecosystem services on degraded lands. *Science*, 2008, 320: 1458-1460.
- [18] 高山远. 胡杨幼苗生长习性与成苗. *新疆林业*, 2007, (2): 34-34.
- [19] 王彦辉, 熊伟, 于澎湃, 沈振西, 郭春明, 管伟, 马长明, 叶兵, 郭浩. 干旱缺水地区森林植被蒸散耗水研究. *中国水土保持科学*, 2006, 4(4): 19-25.
- [20] Duan Z, Xiao H, Li X, Dong Z, Wang G. Evolution of soil properties on stabilized sands in the Tengger Desert, China. *Geomorphology*, 2004, 59: 237-246.
- [21] Wang X, Chen F, Hasi E, Li J. Desertification in China: an assessment. *Earth-Science Reviews*, 2008, 88: 188 - 206.
- [22] Xu L H, Wang Y, Yu P, Shi Z, Xiong W, Mo F, Zhang S, Dong X. Hydrological impacts of afforestation: a case study based on simulation of TOPOG in the small watershed of Caogou in Liupan Mountains, China. *Resource Ecology*, 2010, 1: 202-210.
- [23] Yu P, Wang Y, Wu X, Dong X, Xiong W, Bu G, Wang S, Wang J, Liu X, Xu L. Water yield reduction due to forestation in arid mountainous regions, northwest China. *Sediment Research*, 2010, 25: 423-430.
- [24] Allen A, Chapman D. Impacts of afforestation on groundwater resources and quality. *Hydrogeology Journal*, 2001, 9(4): 390-400.
- [25] Salm C V D, Gon H D V D, Wieggers R, Bleeker A, Toorn A V D. The effect of afforestation on water recharge and nitrogen leaching in the Netherlands. *Forest Ecology and Management*, 2006, 221(1/3): 170-182.
- [26] 国家气象局. 中国气象年鉴. 北京中国气象出版社, 2002-2012.
- [27] 国家林业局. 全国林业统计年报. 北京中国林业出版社, 1960-2012.
- [28] Papale D, Valentini R. A new assessment of European forests carbon exchanges by eddy fluxes and artificial neural network spatialization. *Global Change Biology*, 2003, 9: 525-535.
- [29] Dawson C W, Wilby R. An artificial neural network approach to rainfall-runoff modelling. *Hydrological Sciences Journal*, 1998, 43(1): 47-66.
- [30] 金龙, 申双和. 水面蒸发计算的人工神经网络方法研究. *南京气象学院学报*, 1996, 19: 342-347.
- [31] Rumelhart D E, Hinton G E, Williams R J. Learning representations by back-propagating errors. *Nature*, 1986, 323: 533-536.
- [32] Vapnik V N, Vapnik V. *Statistical learning theory*. New York: Wiley, 1998.
- [33] Mohandes M A, Halawani T O, Rehman S, Hussain A A. 2004. Support vector machines for wind speed prediction. *Renew Energy*, 2004, 29: 939-947.
- [34] Tripathi S, Srinivas V V, Nanjundiah R S. Downscaling of precipitation for climate change scenarios: a support vector machine approach. *Journal of Hydrology*, 2006, 330: 621-640.
- [35] Drake J M, Randin C, Guisan A. Modelling ecological niches with support vector machines. *Journal of Applied Ecology*, 2006, 43(3): 424-432.
- [36] Yang F, White M, Michaelis A R, Ichii K, Hashimoto H, Votava P, Zhu A X, Nemani R R. Prediction of continental-scale evapotranspiration by combining MODIS and AmeriFlux data through support vector machine. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2006, 44(11): 3452-3461.
- [37] Xiao J, Zhuang Q, Law B E, Chen J, Baldocchi D D, Cook D R, Oren R, Richardson A D, Wharton S, Ma S, Martin T A, Verma S B, Suyker A E, Scott R L, Monson R K, Litvak M, Hollinger D Y, Sun G, Davis K J, Bolstad P V, Burns S P, Curtis P S, Drake B G, Falk M, Fischer M L, Foster D R, Gu L, Hadley J L, Katul G G, Matamala R, McNulty S, Meyers T P. A continuous measure of gross primary production for the conterminous United States derived from MODIS and AmeriFlux data. *Remote sensing of environment*, 2010, 114(3): 576-591.
- [38] Wu X, Kumar V, Ross Quinlan J, Ghosh J, Yang Q, Motoda H, McLachlan G J, Ng A, Liu B, Yu P S, Zhou Z H, Steinbach M, Hand D J, Steinberg D. 2007. Top 10 algorithms in data mining. *Knowledge and Information Systems*, 2007, 14: 1-37.
- [39] Wang K, Wang P, Li Z, Cribb M, Sparrow M. A simple method to estimate actual evapotranspiration from a combination of net radiation, vegetation index, and temperature. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984—2012)*, 2007, 112(D15).
- [40] Wang K, Dickinson R E, Wild M, Liang S. Evidence for decadal variation in global terrestrial evapotranspiration between 1982 and 2002: 1. Model

- development. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*(1984—2012),2010;115.
- [41] Yuan W, Liu S, Yu G, Bonnefond J M, Chen J, Davis K, Desai A R, Goldstein A H, Gianelle D, Rossi F, Suyker A E, Verma S B. Global estimates of evapotranspiration and gross primary production based on MODIS and global meteorology data. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(7):1416-1431.
- [42] Fisher J B, Tu K P, Baldocchi D D. Global estimates of the land - atmosphere water flux based on monthly AVHRR and ISLSCP-II data, validated at 16 FLUXNET sites. *Remote Sensing of Environment*,2008,112;901-919.
- [43] 国家林业局.第七次全国森林资源清查结果.北京中国林业出版社,2009.
- [44] 刘勇,李国雷,林平,姜辉,于海群,吕瑞恒.华北落叶松人工幼,中龄林土壤肥力变化.北京林业大学学报,2009,31(3):17-23.
- [45] 宋庆丰,杨新兵,张金柱,曹云生,张伟,冯学全.雾灵山典型林分枯落物和土壤水文效应[J].生态环境学报,2009,18(6):2316-2320.
- [46] 李树人,赵勇,闫志平,赵体顺,李向东,聂宏善.豫西伏牛山区日本落叶松林水文效应研究.林业科学,1999,35(1):48-53.
- [47] 纳磊,张建军,朱金兆,董煌彪,王鹏,袁琳丽.晋西黄土区不同土地利用类型坡面土壤饱和和导水率研究.水土保持研究,2008,15(3):69-73.
- [48] 张社奇,王国栋,刘云鹏,刘建军,贾根良.黄土高原人工油松林地土壤微生物的分布特征.激光生物学报,2006,14(5):353-358.
- [49] 吴秉礼,石建忠,谢忙义,贺立勇,陈小华,赵军营.甘肃水土流失区防护效益森林覆盖率研究.生态学报,2003,23(6):1125-1137.
- [50] 窦建德,王绪芳,熊伟,王彦辉,于澎涛,郭浩.宁夏六盘山北侧 5 种典型植被的土壤持水性能研究.林业科学研究,2006,19(3):301-306.
- [51] 刘端,张毓涛,郝帅,韩燕梁.天山云杉林下土壤物理性质空间异质性研究.安徽农业大学学报,2009,(3):397-402.
- [52] 韩胜利,田有亮,何炎红,郭连生.大青山油松人工林地土壤物理特性研究.内蒙古农业大学学报:自然科学版,2009,29(4):58-63.
- [53] Guan L, Sun G, Cao S. China's bureaucracy hinders environmental recovery. *Ambio*,2011,40:96-99.
- [54] 北京市社会科学院.北京水资源状况及用水结构分析.北京社会科学,2000(1):40-44.
- [55] 肖金成,李娟,戚仁广.京冀水资源补偿机制研究.经济研究参考,2011(46):15-25.
- [56] Fraiture C. Integrated water and food analysis at the global and basin level. An application of WATERSIM. *Water Resource Management*,2007,21:185-198.
- [57] 贺士元.北京植物志.北京:北京出版社,1993.
- [58] 河北植物志编辑委员会.河北植物志.石家庄:河北科学技术出版社,1986.
- [59] 内蒙古植物志编辑委员会.内蒙古植物志.呼和浩特:内蒙古人民出版社,1989.
- [60] 刘天慰.山西植物志.北京:中国科学技术出版社,1992.
- [61] 牛春山.陕西植物志.北京:中国林业出版社,1990.
- [62] 丁宝章,王遂义.河南植物志.第三册.郑州:河南科学技术出版社,1981.
- [63] 张志翔.树木学(北方本).北京:中国林业出版社,2008
- [64] 国家统计局.中国统计年鉴.北京:中国统计出版社,1960-2012.