

## 温岭市沿海多地形地区绿地生态补偿能力评价及优化对策

汤琳娜<sup>1</sup>, 赵佳美<sup>2</sup>, 鲁小珍<sup>1</sup>

(1. 南京林业大学 南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037; 2. 温岭市农业林业局, 浙江 温岭 317500)

**摘要:** 以温岭市为例, 探索浙东地区因地理位置、地形地貌、气候条件、产业结构等差异形成的多样环境下的林地生态补偿应用, 将“绿当量”模型作为评价基础, 结合市内典型生态问题将降尘、吸收 CO<sub>2</sub> 及 SO<sub>2</sub> 作为主要补偿目的计算温岭市不同林地的生态补偿能力。并据此对不同区域如何提高补偿效率提出相应优化建议。

**关键词:** 绿地; 生态补偿能力; 评价; 优化建议

**中图分类号:** F16.23; S718.55<sup>+</sup>7      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-3776(2018)02-0088-09

### Evaluation and Countermeasures for Eco-Compensation of Green Plots in the Coastal Wenling

TANG Lin-na<sup>1</sup>, ZHAO Jia-mei<sup>2</sup>, LU Xiao-zhen<sup>1</sup>

(1. Southern Modern Forestry Synergy and Innovation Center of Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;

2. Wenling Agricultural and Forestry Bureau of Zhejiang, Wenling 317500, China)

**Abstract:** Evaluations were carried out on eco-compensation of green plots in the coastal Wenling of Zhejiang province, with different geographical locations, landforms, climate and industry structure. On the basis of the model “Green Equivalent” and compensation for the typical ecological problems in Wenling such as dust fall, CO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub>, calculation was made different green plots. Countermeasures were put forwarded like increase of the compensation efficiency in different regions.

**Key words:** green plot; eco-compensation capacity; evaluation; suggestions

随着城市化的推进, 许多基础设施建设和林地生态保护之间出现了一系列复杂矛盾, 2016年5月, 国务院办公厅发布《关于健全生态保护补偿机制的意见》, 提示我们需从生态补偿角度对规划做出新的调整<sup>[1]</sup>。赖敏等<sup>[2]</sup>从生态服务价值的角度提出了补偿额度的系统计算。叶文虎、邹振扬等<sup>[3-4]</sup>在植被还原原理基础上提出了城市生态补偿能力评估。金成波和阚占文<sup>[5-6]</sup>分别从政策及经济角度阐述了林业生态补偿机制的必要性。以上研究表明, 林地生态补偿方面的研究将为未来规划各阶段调整提供有力科学依据, 亦可作为现存方案经济性与合理性的评价标准, 对森林资源的保护和改善具有十分重要的理论及实践意义。

研究地温岭市境内地形多样, 林地类型丰富, 补偿种类较为全面。全市一些生态问题较为典型突出, 其中包含了机动车尾气、工业废气及温室气体带来的环境污染, 林地生态功能发挥不显著, 林地生产力不高等<sup>[7]</sup>。因而, 温岭市林地的生态补偿评价结果及建议将对其他地区同类研究具有一定借鉴意义。

收稿日期: 2017-09-06; 修回日期: 2018-01-19

作者简介: 汤琳娜, 硕士生, 从事应用生态研究; E-mail: 376193865@qq.com。通信作者: 鲁小珍, 副教授, 从事生态学研究; E-mail: 188089555@qq.com。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

温岭市位于浙江省东南沿海, 全市陆域面积 926 km<sup>2</sup>, 海域面积 1 079 km<sup>2</sup>。121°9'50" ~ 121°44'0" E, 28°12'45" ~ 28°32'2" N。境内地势西高东低, 自西向东逐渐倾斜, 西部和西南部多为低山丘陵, 间有小块河谷平原, 属北雁荡山余脉, 海拔最高 733.9 m, 北部、中部和东南为平原, 局部有丘陵山区, 东南和西南部三面临海。温岭属中亚热带季风气候, 海洋性气候影响明显。全市年平均气温 17.8℃, 全年 4—6 月和 7—9 月为两个明显的雨期, 降雨量的分布特点与地形结构相吻合, 西北部大于东南部, 山区大于平原。温岭市地处沿海, 台风灾害较多, 集中于 5—10 月, 8 月居多。温岭市林地面积 33 412 hm<sup>2</sup>, 全市森林覆盖率达 30.79%, 其中平原林木覆盖率为 19%。按地类分: 有林地 28 404 hm<sup>2</sup>, 占林地面积的 85.01%; 疏林地 196 hm<sup>2</sup>, 占 0.59%; 灌木林地 1 134 hm<sup>2</sup>, 占 3.39%; 未成林造林地 1 822 hm<sup>2</sup>, 占 5.45%; 苗圃地 30 hm<sup>2</sup>, 占 0.09%; 无立木林地 1 475 hm<sup>2</sup>, 占 4.42%; 宜林地 351 hm<sup>2</sup>, 占 1.05%。

### 1.2 数据来源

林地生态补偿能力的评价需依赖多方面基础数据, 结合温岭市实际情况, 研究数据来源包括以下几方面: (1) 应用 RS 和 GIS 技术对 2014 年温岭市工程数据遥感影像进行用地信息的提取 (图 1), 得出温岭市 5 个街道 11 个镇行政区域面积及建设用地面积; (2) 根据《温岭市森林资源规划设计调查成果报告(2009)》、《温岭市现代农林业发展“十三五”规划(2015—2020)》, 整理出温岭市各镇林地地类面积。由于苗圃地、无立木林地、宜林地的生态补偿功能薄弱, 故在下文中不计入补偿面积中。为使评价结果更贴近实际情况, 将草地面积也算入补偿范围内 (表 1); (3) 温岭市农业林业局、温岭市环保局 2105 年全市降尘, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> 生产及排放量统计结果; (4) 2010—2016 年《温岭年鉴》。

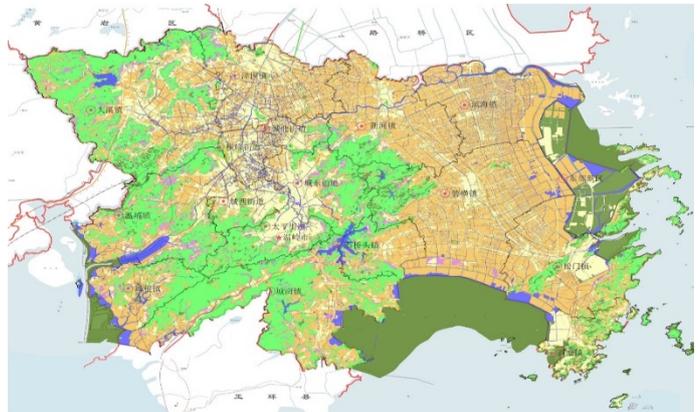


图 1 温岭市土地利用情况遥感影像图

Figure 1 Remote sensing image of land use in Wenling

表 1 温岭市各镇相关用地情况  
Table 1 Land uses in different towns of Wenling

统计单位	行政区域面积/hm <sup>2</sup>	建设用地面积/hm <sup>2</sup>	林地面积/hm <sup>2</sup>				草地
			有林地	疏林地	灌木林地	未成林林地	
太平街道	3 071	980	1 841	0	54	0	44
城东街道	4 259	938	1 894	0	104	0	116
城西街道	1 973	593	647	0	19	101	9
城北街道	1 256	311	298	0	39	0	8
横峰街道	1 627	424	136	0	1	0	3
泽国镇	6 331	1 451	622	12	22	0	12
大溪镇	12 943	1 486	6 207	0	266	561	259
松门镇	8 280	1 403	1 631	0	114	306	469
箬横镇	11 160	1 378	1 489	97	101	0	277
新河镇	7 137	962	905	0	61	0	230
石塘镇	2 893	280	671	55	40	113	612
滨海镇	5 627	555	179	0	47	0	0
温峤镇	7 734	718	3 891	10	19	209	200
城南镇	10 910	792	5 612	22	210	527	206
石桥头镇	2 842	330	991	0	23	5	13
坞根镇	3 464	305	1 387	0	13	0	62

### 1.3 研究方法

采用叶文虎等<sup>[3]</sup>的“绿当量”模型作为生态补偿能力评价的基础,结合林地主要生态功能(包括维持碳氧平衡、吸收 SO<sub>2</sub>、滞尘减噪等)及市内典型生态问题如大气污染、热岛效应、工业废气等现状,将降尘、吸收 CO<sub>2</sub>及 SO<sub>2</sub>作为主要补偿目的,计算温岭市 5 个街道 11 个镇内有林地、疏林地、灌木林地、未成林林地及草地的综合生态补偿能力。

#### 1.3.1 “绿当量”模型与二维绿量

1.3.1.1 “绿当量”模型 针对同一补偿目的,不同类型的林地所需面积不一样;而同种林地类型,对于不同的补偿目的,所需面积也不一样。在制定宏观规划及发展策略时,不可能从每种林地类型着手,因而需要借助绿当量的概念,将草地的补偿能力定义为基本单位,根据其他类型林地与草地的补偿能力之比便可得到有林地、疏林地、灌木林地、未成林林地的相应绿当量,从而进行评估与规划<sup>[8]</sup>。

综合绿当量的数学形式可表示为:

$$GC = \max_i \left[ \frac{1}{\prod_{j \neq i} K_j^L} G_i^L \right]$$

式中, GC 为综合绿当量, G<sub>i</sub><sup>L</sup>为 L 种绿地 i 种生态补偿目的; K<sub>j</sub><sup>L</sup>为 L 种绿地在完成 j 种生态补偿目的时受完成其它生态补偿目的干扰的系数,在 0~1 之间,可由实验获得; L 为绿地类型, L=1, 2, 3, …… M; i, j 为生态补偿目的, i, j=1, 2, …… N<sup>[3,9]</sup>。

1.3.1.2 二维绿量模型 为客观评价林地面积对补偿效率的影响,引入二维绿量的概念<sup>[8,10]</sup>。根据研究范围各类林地对污染物的综合补偿能力,结合专家意见,可得出各类型林地与草地面积的二维转换系数(表 1),依此可将温岭市有林地、未成林地、疏林地、灌木林地的覆盖面积折算成草地面积。

1.3.2 降尘补偿能力计算 根据《城市生态补偿能力衡量和应用》中提出的模型,评价林地滞尘能力 P<sub>滞尘</sub>的公式如下:

$$P_{\text{滞尘}} = \sum_{j=1}^i A_j / G_j$$

式中, i 为温岭市各镇(街道)的林地类型总数,根据上文取 i=5; A<sub>j</sub>为该镇(街道)内第 j 种林地类型的面积; G<sub>j</sub>为第 j 种林地类型滞尘能力的绿当量(根据文献实验数据平均获得)<sup>[3]</sup>。

1.3.3 CO<sub>2</sub> 补偿能力计算 在同化量法测定植物固碳释氧能力的基础上,根据温岭市实际情况,得出林地对 CO<sub>2</sub> 补偿能力计算方式:

单位叶面积净同化量公式:

$$P = \sum_{i+1}^i \left[ \frac{(P_i + P_{i+1})}{2} \times (t_{i+1} - t_i) \times 3600 \times 10^{-3} \right]$$

式中, P 为单位叶面积日同化量 (mmol); P<sub>i</sub>为第一测点瞬时净光合速率(μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>); P<sub>i+1</sub>为下一测点净光合速率(μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>); t<sub>i</sub>为第一测点时间(h); t<sub>i+1</sub>为下一测点时间(h)<sup>[11-12]</sup>。

林地对 CO<sub>2</sub> 补偿量计算:

$$P_i(\text{CO}_2) = \sum_{j=1}^i [P_j \times LAI_j \times S_{ij} \times 365 \times 44 \times 10^{-9}]$$

式中, P<sub>i</sub>为 i 镇(街道)对 CO<sub>2</sub> 的年补偿量(t); P<sub>j</sub>为 j 类林地的日均单位叶面积同化量(可由地方数据及实验获得); LAI<sub>j</sub>为 j 类林地的叶面积指数; S<sub>ij</sub>为第 i 镇(街道)内 j 类林地的面积(hm<sup>2</sup>)。以此可计算各镇林地对 CO<sub>2</sub> 的年均补偿率。

1.3.4 SO<sub>2</sub> 补偿能力计算 根据文献资料可知平均干叶质量为 37 g·m<sup>-2</sup>; 每克干叶 SO<sub>2</sub> 吸收能力: 乔木 8.5 mg,

表 2 各类绿地二维绿量转换系数  
Table 2 Conversion coefficient of two dimensional green biomass of different green plots

林地类型	二维转换系数
草地	1.0
有林地	1.5
疏林地	0.8
灌木林地	1.2
未成林地	0.3

注: 各类绿地面积均取 1 m<sup>2</sup>。

灌木 4 mg, 草地 1 mg<sup>[4,13]</sup>。由此可得计算 SO<sub>2</sub> 补偿率公式:

$$E_i(\text{SO}_2) = \sum_{j=1}^4 \frac{S_{ij} \times LAI_j \times 37 \times P_j \times 10^{-2}}{Q_i} \times 100\%$$

式中,  $E_i$  为  $i$  镇 (街道) 对 SO<sub>2</sub> 的补偿率;  $S_{ij}$  为第  $i$  镇 (街道) 内  $j$  类林地的面积;  $LAI_j$  为  $j$  类林地叶面积指数;  $P_j$  为  $j$  类林地吸收 SO<sub>2</sub> 能力 (mg·g<sup>-1</sup>);  $Q_i$  为  $i$  镇 (街道) SO<sub>2</sub> 年排放量 (t)。

## 2 结果与分析

### 2.1 降尘补偿评价

2.1.1 降尘补偿结果 经计算温岭市林地对降尘的补偿能力为 84.07 t·km<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>, 吸收能力理论上可达到该市全年排尘的 1.21 倍。由表 3 可看出林地降尘补偿的评价结果与地方统计的各镇全年总体滞尘率及二维绿量占比并非完全正相关, 且理论值高于实际总体滞尘率, 因此需考虑其他影响因素。

表 3 绿地降尘补偿结果与总体滞尘及二维绿量关系  
Table 3 Relationship between dust fall compensation and two dimensional green biomass

统计单位	林地降尘理论补偿率	全年实际滞尘率	二维绿量占比	统计单位	林地降尘理论补偿率	全年实际滞尘率	二维绿量占比
太平街道	1.48	0.37	0.63	箬横镇	0.86	0.20	0.24
城东街道	3.12	0.52	0.72	新河镇	0.85	0.24	0.23
城西街道	1.12	0.30	0.49	石塘镇	1.33	0.22	0.57
城北街道	2.24	0.27	0.39	滨海镇	0.27	0.19	0.05
横峰街道	0.08	0.08	0.13	温峤镇	1.02	0.16	0.78
泽国镇	0.09	0.10	0.15	城南镇	3.06	0.30	0.83
大溪镇	3.24	0.33	0.73	石桥头镇	301	0.22	0.54
松门镇	2.68	0.28	0.37	坞根镇	94	0.26	0.62

2.1.2 林地结构对滞尘能力的影响 重点考虑有林地、灌木林地与草地的滞尘能力 (疏林地、未成林地等滞尘能力弱且面积可忽略不计), 将各镇 3 类林地面积在总林地面积中占比与总体滞尘率数据 (表 4) 在加权修正后进行拟合 (图 2), 可以看出二维绿量相当时对滞尘率的影响草地>灌木林地>有林地。

表 4 三类绿地在总绿地面积中占比  
Table 4 Percentage of green plots in the total one

统计单位	各类型总绿地面积占比			统计单位	各类型总绿地面积占比		
	有林地	灌木林地	草地		有林地	灌木林地	草地
太平街道	0.95	0.03	0.02	箬横镇	0.80	0.05	0.15
城东街道	0.90	0.05	0.05	新河镇	0.76	0.05	0.19
城西街道	0.96	0.03	0.01	石塘镇	0.50	0.03	0.47
城北街道	0.86	0.06	0.02	滨海镇	0.76	0.24	0.00
横峰街道	0.97	0.01	0.02	温峤镇	0.95	0.00	0.05
泽国镇	0.95	0.03	0.02	城南镇	0.93	0.03	0.03
大溪镇	0.92	0.04	0.04	石桥头镇	0.96	0.02	0.01
松门镇	0.74	0.05	0.21	坞根镇	0.95	0.01	0.04

2.1.3 其他因素对林地滞尘的影响 温岭各镇立地条件复杂多样, 除绿地类型外, 各镇工业所占比重也是影响补偿效率的原因, 尤其是后者中的污染企业是需要持续关注的源头问题。大溪镇和城东街道二维绿量占比与林地结构都相近, 但由于大溪镇工业污染较多因而实际滞尘率较低。此外, 石塘、松门等沿海地区易受台风灾害影响, 因而 8 月的降尘量会高于其他镇, 期间二次扬尘带来的影响更大, 同时恶劣的天气也会影响林地补偿功能的发挥。

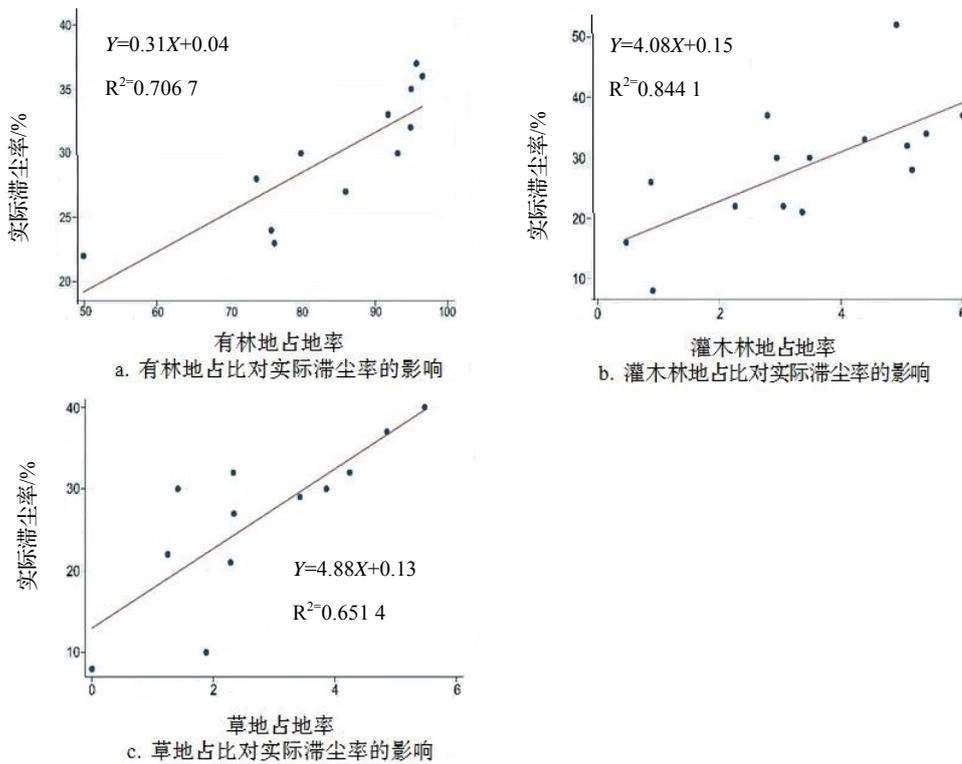


图 2 温岭市不同类型绿地与实际滞尘率的相关关系

Figure 2 Correlation between different green types and dust fall rate

## 2.2 对 CO<sub>2</sub> 补偿评价

温岭市林地可补偿该市每年排放 CO<sub>2</sub> 的 20.02%，各镇之间补偿结果差异较大。将计算结果与相关统计数据 进行对比，进一步分析各要素对绿地补偿 CO<sub>2</sub> 效率的影响（表 5）。

表 5 绿地 CO<sub>2</sub> 补偿结果与其他要素的关系  
Table 5 Relationship between CO<sub>2</sub> compensation rate of green plots and other factors

统计单位	绿地 CO <sub>2</sub> 补偿率	二维绿量占比	人口密度/(人·hm <sup>-2</sup> )	建设用地占比	工业污染情况
太平街道	0.11	0.63	374	0.32	一般
城东街道	0.21	0.72	289	0.22	良好
城西街道	0.09	0.49	198	0.30	一般
城北街道	0.05	0.39	155	0.25	严重
横峰街道	0.02	0.13	51	0.26	严重
泽国镇	0.07	0.15	61	0.23	严重
大溪镇	0.12	0.73	307	0.11	严重
松门镇	0.11	0.37	149	0.17	严重
箬横镇	0.62	0.24	94	0.12	良好
新河镇	0.57	0.23	93	0.13	良好
石塘镇	0.13	0.57	227	0.10	严重
滨海镇	0.15	0.05	20	0.10	良好
温峤镇	0.26	0.78	313	0.09	一般
城南镇	0.33	0.83	331	0.07	一般
石桥头镇	0.48	0.54	215	0.12	良好
坞根镇	0.30	0.62	249	0.09	一般

表 5 显示，温岭市林地对 CO<sub>2</sub> 的补偿率基本随着二维绿量增多而变高，但城北、大溪、松门、石塘因当地 工业污染情况相对严重，虽然绿量占比并不低，但补偿结果却不可观。可见各地区产业结构的不同是造成补偿 结果差异的重要原因。

从社会因素来看，城区的补偿率明显小于温峤、城南、坞根以山林地为主的地区。然而，数据表明单纯的

人口数量增加对补偿结果的影响并不明显,但随着建设用地的同时增加,就会降低林地对 CO<sub>2</sub> 的补偿率。另外,城东街道作为城区,在其他条件相似的情况下,其绿量虽高于石桥头镇,但补偿率仅为后者的 43%。故而表明社会经济活动带来的总体影响远大于单纯人口及林地面积带来的影响。

### 2.3 对 SO<sub>2</sub> 补偿能力评价

计算得出温岭市林地可补偿全市年 SO<sub>2</sub> 排放量的 22.8%,工业污染严重的地区补偿结果普遍更低。根据各镇 SO<sub>2</sub> 补偿现状,以国家二级 SO<sub>2</sub> 浓度排放标准为补偿目标,可计算温岭市各镇所需生态补偿量,并将其换算成各类林地补偿方案的计算公式如下<sup>[3]</sup>:

$$GP_{ij} = \Delta B_i \times S_i \times H \times G_j \times 365 \times 10^{-3}$$

其中:  $GP_{ij}$  为第  $i$  镇(街道)补偿 SO<sub>2</sub> 污染需要  $j$  类型林地的生态补偿量 (hm<sup>2</sup>),着重拟出有林地、灌木林地、草地 3 种补偿方案;  $\Delta B_i$  为各镇(街道) SO<sub>2</sub> 浓度的超标值 (mg·m<sup>-3</sup>·d<sup>-1</sup>);  $S_i$  为  $i$  镇(街道)面积 (km<sup>2</sup>);  $H$  为植物所能补偿 SO<sub>2</sub> 的有效高度,此处取  $H=10$  m;  $G_j$  为  $j$  种绿地类型的绿当量 (hm<sup>2</sup>·t<sup>-1</sup>·a<sup>-1</sup>)。

由表 6 可看出(新河镇、城南镇、坞根镇 SO<sub>2</sub> 浓度已达标,故不列入表内),温岭市大部分地区理论上都需要进行林地生态补偿,但各地区可根据实际用地现状及立地条件,选择二维绿量的扩建或是改善原有林地空间结构,在面积不变的情况下提高其补偿效率。而一些超标严重的地区如松门镇、石塘镇、滨海镇等,则不能完全依赖生态补偿措施,应从源头出发,加快产业转型,改变当地能源结构。

表 6 温岭市各镇(街道) SO<sub>2</sub> 补偿结果及林地建设方案  
Table 6 SO<sub>2</sub> compensation rate and construction plan in Wenling

统计单位	SO <sub>2</sub> 补偿率	林地补偿方案(只选其一即可)		
		有林地/hm <sup>2</sup>	灌木林地/hm <sup>2</sup>	草地/hm <sup>2</sup>
太平街道	0.38	1.82	3.93	30.26
城东街道	0.28	2.52	5.46	41.97
城西街道	0.55	0.22	0.47	3.60
城北街道	0.16	0.69	1.49	11.46
横峰街道	0.10	0.36	0.77	5.94
泽国镇	0.18	0.83	1.80	13.86
大溪镇	0.35	0.28	0.61	4.72
松门镇	0.09	7.62	16.50	126.94
箬横镇	0.10	5.13	11.12	85.54
石塘镇	0.04	7.16	15.51	119.32
滨海镇	0.01	16.14	34.98	269.06
温峤镇	0.86	0.85	1.83	14.11
石桥头镇	0.55	0.37	0.81	6.22

## 3 结论

(1) 温岭全市林地对降尘的补偿能力为 84.07 t·km<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,理论上吸收能力可达该市全年排尘的 1.21 倍。林地降尘计算理论值高于各镇实际全年滞尘率,且与各镇二维绿量占比并非完全正相关。通过数据拟合分析出二维绿量相当时对滞尘率的影响排序为草地>灌木林地>有林地。此外,地区产业结构、地理位置、气候条件也是影响林地降尘补偿结果的因素。

(2) 温岭全市林地可补偿每年排放 CO<sub>2</sub> 的 20.02%,各镇之间补偿结果差异较大。林地对 CO<sub>2</sub> 的补偿率与二维绿量占比基本呈正相关,但受地区工业污染影响较大。从社会因素来看,城区 CO<sub>2</sub> 补偿率明显小于山林地区。因此社会经济活动带来的总体影响远大于单纯人口及林地面积带来的影响。

(3) 温岭市林地可补偿全市年 SO<sub>2</sub> 排放量的 22.8%,工业污染严重的地区补偿结果普遍更低。大部分地区理论上都需要进行林地生态补偿,而一些超标严重的地区则不能完全依赖生态补偿措施,还应从源头出发,加快产业转型,改变当地能源结构。

综上所述,林地对降尘,CO<sub>2</sub>,SO<sub>2</sub> 的补偿结果均受各类林地绝对面积的影响。但温岭市作为浙东沿海多地形地区的典型代表,各镇地形差异、地理位置、社会经济变化复杂导致了补偿结果间的差异,因而需对评价结

果的影响因素及如何提高不同区域林地补偿效率作进一步探讨。

## 4 讨论与建议

### 4.1 降尘补偿结果讨论

4.1.1 影响因素探讨 林地降尘机理主要分为物理和化学两个方面,物理降尘主要通过林地复杂的冠层结构来改变含尘气流的速度及方向,从而加快颗粒物的沉降,受二次扬尘影响大<sup>[14-16]</sup>;而化学降尘则是通过植物吸收有机物质和分解颗粒物,受温度、湿度、地形、已有滞尘量等因素影响<sup>[17-18]</sup>。因此在面积相当的前提下,结构的不同以及各镇复杂的地理条件均会影响林地滞尘能力。

研究表明,复层结构的林地滞尘能力要远远大于单一结构的林地<sup>[14,19-21]</sup>,而草地、灌木对实际补偿率影响更大是因为地被植物及地表枯枝落叶等低矮林层结构能有效减少二次扬尘的发生<sup>[22-25]</sup>。因而,调整林地的结构、使之具备更丰富的竖向结构,比增加林地面积的补偿方式更为经济有效<sup>[26]</sup>。但需要注意的是,当森林郁闭度超过一定阈值后,气流难以扩散,林内颗粒物浓度急剧增高会导致森林滞尘能力的降低甚至出现负效应<sup>[20,27-28]</sup>,这也是有些山地地区林地资源丰富、评价结果较高,但实际降尘控制率不高的原因。

各类环境因素对林地降尘补偿能力的影响多体现为动态的变化关系,如季节对落叶树的补偿能力影响<sup>[26,29]</sup>。此外还涉及到各镇自然条件、植被资源、社会经济、功能定位等多方面差异带来的综合效应。但无论如何,工业及交通污染始终是造成补偿结果降低的重要原因。

4.1.2 优化建议 林地降尘补偿的优化可以分为“汇”与“源”两个方面,前者侧重改进现状,提高补偿效率;后者则从源头出发,减少需补偿的污染数量。因而,一方面需要整体控制林地的配置结构与郁闭程度,对林地进行合理疏伐<sup>[26]</sup>。另一方面要考虑沿海防护林的营造和修复,因林带可以有效改变气流结构,成为抵御降尘污染的第一道防线<sup>[30-31]</sup>。而温岭现有沿海防护林林带规模偏小,质量参差不齐,局部存在断带、缺口,这是导致沿海地区补偿率偏低的一个重要原因。

### 4.2 CO<sub>2</sub> 补偿结果讨论

4.2.1 影响因素探讨 从排放来源看,工业所占比重最大。马巾英等在对厦门市碳氧平衡评价中发现工业排碳量已超过全年排碳总量的80%<sup>[32]</sup>;杨士弘在对广州市树木吸收CO<sub>2</sub>能力的研究中发现平衡燃煤燃油所需绿化量是现有绿地面积的17倍<sup>[33]</sup>。因而仅靠绿量的增加不可能实现良好的补偿效果,地方工业排放的源头控制对林地CO<sub>2</sub>补偿的评价结果有着关键的影响。而从区域功能划分出发,城区是CO<sub>2</sub>排放的主要来源<sup>[34]</sup>。但各类研究结果表明仅仅是人口增长带来的驱动力并不明显,厦门市评价结果中人口呼吸的排碳耗氧占比不足0.01%<sup>[32]</sup>,城市化进程的综合水平才是CO<sub>2</sub>排放的核心驱动力<sup>[34-35]</sup>。一般而言,发达地区随着产业结构的成熟化,城市人均CO<sub>2</sub>排放量会小于农村,目前长三角地区总体情况已经满足<sup>[34-36]</sup>,但就温岭市评价结果可见,除去一些工业污染严重的镇,城市的整体补偿结果还是低于农村,一方面因为城市用地紧张,二维绿量占比不如山区;另一方面则表明了温岭城市发育程度仍不高,比如在主城区太平街道中还镶嵌着工业区,城区中秸秆燃烧也不罕见,这些因素都会从源头影响林地的补偿效率。

从林地本身补偿能力出发,一方面受到群落针阔比的影响,李晓曼等在广州森林生态系统碳汇能力研究中得出,阔叶树对CO<sub>2</sub>的补偿可达总净固定CO<sub>2</sub>量的56.3%,马尾松林占8.8%<sup>[37]</sup>。而温岭山地植被中松类在乔木中占绝对优势,因而会影响到评价结果。另一方面,选择优良的地方树种会大幅提高林地对CO<sub>2</sub>的补偿效率<sup>[33,37]</sup>。此外,林地补偿功能的发挥还会受到突发性干扰因素的影响,包括采伐、围垦等人为因素及火烧、台风等自然因素,对于这些因素的影响结果目前学界研究结果并不统一,但干扰等级和时长的不同一定会带来影响程度的改变<sup>[38]</sup>。

4.2.2 优化建议 可将城区作为重点改造对象,针对老城区人口密集、拆迁困难的现状,完善群落配置,利用地方树种增加速生大树冠阔叶乔木的数量,提高单位面积补偿能力<sup>[39-40]</sup>。完善农村农田防护林网结构,在CO<sub>2</sub>补偿同时还能通过固碳、调节水分等作用控制农田生态系统的其他温室气体排放<sup>[30,41]</sup>。山地则应推进阔叶化改

造, 提升林分质量, 控制森林火灾。同时利用人为的有效干扰<sup>[42]</sup>, 缩短演替周期改善松林生态补偿功能。

### 4.3 SO<sub>2</sub> 补偿结果讨论

4.3.1 影响因素探讨 大气中的 SO<sub>2</sub> 排放主要来自工业污染, 其次为交通尾气、城市建设<sup>[43]</sup>, 而林地吸收 SO<sub>2</sub> 需要一个过程, 离排放源近的林地会首先发生作用, SO<sub>2</sub> 在散播过程中仍会继续造成污染。然而林地现有含 S 量会影响其补偿能力, 袁正科等在探讨湖南森林生态系统净化 SO<sub>2</sub> 能力时发现污染区的平均树木叶片含 S 量为非污染区的 6 倍左右<sup>[44]</sup>, 这会导致排放的 SO<sub>2</sub> 不能在第一时间被很好的吸收, 从而造成二次污染。以滨海镇为例, 该地区本身环境良好, 但因该地区以大片的农田为主, 二维绿量很低, 因而补偿效果差。

影响林地补偿 SO<sub>2</sub> 的还有各类环境因素, 其中以风速和光照影响最大。前者主要决定了 SO<sub>2</sub> 的扩散程度, 而后者影响光合作用的强度, 决定了植物对 SO<sub>2</sub> 的需求量<sup>[43-44]</sup>。

4.3.2 优化建议 根据 SO<sub>2</sub> 的补偿特点, 应增强从工业区到山林地净化系统的连续性, 利用林带、林网对气流的控制作用减小污染源的扩散, 将其合理导向林地分布多、吸收能力强的山地。山林地区一方面可以增加林下灌木、草地面积, 另一方面要利用林窗控制光照、降雨等影响。此外可利用四旁林优秀的补偿能力, 在城区及农村优先选择补偿方案中的有林地、灌木林地, 多采用樟 *Cinnamomum camphora* 等强力树种<sup>[43-45]</sup>, 以提高补偿效率来解决用地紧张的矛盾。

### 参考文献:

- [1] 王金南, 刘桂环, 文一惠, 等. 构建中国生态保护补偿制度创新路线图——《关于健全生态保护补偿机制的意见》解读[J]. 环境保护, 2016 (10): 14-18.
- [2] 赖敏, 吴绍洪, 尹云鹤, 等. 三江源区基于生态系统服务价值的生态补偿额度[J]. 生态学报, 2015, 35 (2): 227-236.
- [3] 叶文虎, 魏斌, 全川. 城市生态补偿能力衡量和应用[J]. 中国环境科学, 1998 (4): 11-14.
- [4] 邹振扬, 黄天其. 试论城乡开发自然生态补偿的植被还原原理[J]. 重庆环境科学, 1992 (1): 18-21.
- [5] 金成波. 实施生态补偿政策对林业发展的影响探讨[J]. 林业科技情报, 2015, 47 (3): 61-67.
- [6] 阙占文. 比较视野下的林业生态补偿制度[J]. 经济问题探索, 2011 (7): 129-133.
- [7] 郑四渭, 唐志, 姬亚岚, 等. 浙江林业现代化建设目标研究[J]. 浙江林学院学报, 2005, 22 (1): 87-92.
- [8] 杨东兴. 基于 RS 和 GIS 技术的济南市绿地景观格局分析与生态绿地系统规划研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2010.
- [9] Seabrook L, Mcalpine C A, Bowen M E. Restore, repair or reinvent: Options for sustainable landscapes in a changing climate[J]. Landscape & Urban Planning, 2011, 100 (4): 407-410.
- [10] 管恩翠. 基于 GIS 武汉市中心城区二维绿量测算[D]. 武汉: 华中农业大学, 2007.
- [11] 鲁敏, 秦碧莲, 牛朝阳, 等. 城市植物与绿地固碳释氧能力研究进展[J]. 山东建筑大学学报, 2015, 30 (4): 363-369.
- [12] 李辉. 北京五种草坪地被植物生态效益的研究[J]. 中国园林, 1998, 14 (4): 36-38.
- [13] LANDSBERG J J, KAUFMANN M R, BINKLEY D, et al. Evaluating progress toward closed forest models based on fluxes of carbon, water and land nutrients[J]. Tree Physiol, 1991, 9 (12): 1.
- [14] 栗志峰, 刘艳, 彭倩芳. 不同绿地类型在城市中的滞尘作用研究[J]. 干旱环境监测, 2002, 6 (3): 162-163.
- [15] 任启文, 王成, 郗光发, 等. 城市绿地空气颗粒物及其与空气微生物的关系[J]. 城市环境与城市生态, 2006, 19 (5): 22-25.
- [16] 柴一新, 祝宁, 韩焕金. 城市绿化树种的滞尘效应——以哈尔滨为例[J]. 应用生态学报, 2002, 13 (9): 1121-1125.
- [17] 郭二果. 北京西山典型游憩林生态保健功能研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2008.
- [18] 黄会一, 张友标, 张春兴. 木本植物对大气气态污染物吸收净化作用的研究 [J]. 生态学报, 1981, 1 (4): 335-343.
- [19] 郑少文, 刑国明, 李军, 等. 北方常见树种的滞尘效应 [J]. 山西农业大学学报: 自然科学版, 2008, 28 (4): 383-387.
- [20] 孙淑萍, 古润泽, 张晶. 北京城区不同绿化覆盖率和绿地类型与空气中可吸入颗粒物 (PM10) [J]. 中国园林, 2004 (3): 77-79.
- [21] 刘学全, 唐万鹏, 周志翔, 等. 宜昌市城区不同绿地类型环境效应[J]. 东北林业大学学报, 2004, 32 (5): 53-54.
- [22] FOWLER D, CAPE J N, UNSWORTH M H, et al. Deposition of atmospheric pollutants on forest[J]. Philos Trans Royal Soc London, 1989, 324 (1223): 247-265.
- [23] BECKETT K P, FREER-SMITH P H, TAYLOR G. Urban woodlands: their role in reducing the effects of particulate pollution[J]. Environ Pollut, 1998, 99 (3): 347-360.
- [24] 苏俊霞, 靳绍军, 闫金广, 等. 山西师范大学校园主要绿化植物滞尘能力的研究[J]. 山西师范大学学报: 自然科学版, 2002, 20 (2): 86-88.

- [25] 王成, 郝光发, 彭镇华. 有机地表覆盖物在城市林业建设中的应用价值[J]. 应用生态学报, 2002, 20(2): 86-88.
- [26] 王晓磊, 王成. 城市森林调控空气颗粒物功能研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(8): 1911-1916.
- [27] 殷彬, 蔡静萍, 陈丽萍, 等. 交通绿化带植物配置对空气颗粒物的净化效益[J]. 生态学报, 2007, 27(11): 4590-4595.
- [28] 吴志萍, 王成, 侯晓静, 等. 6种城市绿地空气PM<sub>2.5</sub>浓度变化规律的研究[J]. 安徽农业大学学报, 2008, 35(4): 494-498.
- [29] 吴晓娟, 孙根年. 西安城区植被净化大气污染物的时间变化[J]. 中国城市林业, 2006, 4(6): 31-33.
- [30] 虎小红. 浅谈农田防护林网对几种农业自然灾害的预防作用[J]. 农业科技与信息, 2012(4): 24-25.
- [31] GHIMIRE K, DULIN M W, ATCHISON R L, *et al.* Identification of windbreaks in Kansas using object-based image analysis, GIS techniques and field survey[J]. *Agroforestry Systems*, 2014, 88(5): 865-875.
- [32] 马巾英, 尹锴, 吝涛. 城市复合生态系统碳氧平衡分析——以沿海城市厦门为例[J]. 环境科学学报, 2011, 31(8): 1809-1816.
- [33] 杨士宏. 城市绿化树木碳氧平衡效应研究[J]. 城市环境与城市生态, 1996, 9(1): 37-39.
- [34] GRIMM N B, FAETH S H, GOLUBIEWSKI N E, *et al.* Global change and the ecology of cities[J]. *Science*, 2008, 319: 756-760.
- [35] 蔡博峰, 赵楠, 冯恺. 城市CO<sub>2</sub>排放驱动力的影响因素研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(5): 14-203.
- [36] 蔡博峰, 王金南. 长江三角洲地区城市二氧化碳排放特征研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(10): 45-52.
- [37] 李晓曼, 康文星. 广州城市森林生态系统碳汇功能研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2008, 28(1): 8-13.
- [38] 杨平, 仝川. 不同干扰因素对森林和湿地温室气体通量影响的研究进展[J]. 生态学报, 2012, 32(16): 5254-5263.
- [39] CURRIE B A, BRAD B. Estimates of air pollution mitigation with green plants and green roofs using the UFORE model[J]. *Urban Ecosyst*, 2008, 11(4): 409-422.
- [40] KONIJNENDIJK C C. The forest and the city: The cultural landscape of urban woodland[J]. *Journal of Housing & the Built Environment*, 2008, 25(2): 263-264.
- [41] 黄坚雄, 陈源泉, 隋鹏, 等. 农田温室气体净排放研究进展[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(8): 87-94.
- [42] 蔡锡安, 彭少麟, 赵平, 等. 三种乡土树种在二种林分改造模式下的生理生态比较[J]. 生态学杂志, 2005(3): 243-250.
- [43] 聂蕾, 邓志华, 陈奇伯, 等. 昆明城市森林对大气SO<sub>2</sub>和NO<sub>x</sub>净化效果[J]. 西部林业科学, 2015, 44(4): 116-120.
- [44] 袁正科, 田大伦, 袁穗波. 森林生态系统净化大气SO<sub>2</sub>能力及吸S潜力研究[J]. 湖南林业科技, 2005, 32(1): 1-4.
- [45] 潘辉, 黄石德, 王玉芹. 福州市城市森林吸收SO<sub>2</sub>功能及价值评价[J]. 闽江学院学报, 2014(2): 122-127.