

不同煤种呼吸性粉尘与尘肺病患病风险的剂量-反应关系分析

王雪涛 张鸽

国家卫生健康委职业安全卫生研究中心, 北京 102308

通信作者: 王雪涛, Email: 13146686168@163.com

【摘要】 目的 探讨无烟煤、烟煤、褐煤呼吸性粉尘与尘肺病累计患病率的剂量-反应关系, 为科学制定职业卫生标准提供依据。方法 对 9 处国有煤矿采煤工人的接尘和尘肺病患病情况进行调查研究, 以寿命表法分别计算出无烟煤、烟煤、褐煤呼尘累计接尘量对应的累计患病率, 利用线性回归方程进行单侧区间统计控制, 得到呼尘接触浓度限值。结果 9 处煤矿共 21 000 名采煤工人纳入研究, 其中无烟煤、烟煤、褐煤煤矿采煤工人尘肺病检出率分别为 11.27%、21.32%、6.00%, 平均接尘工龄为 20.12、22.88、25.21 年。无烟煤、烟煤、褐煤煤矿采煤工人呼尘累计接尘量与尘肺病累计患病率的剂量-反应关系分别为线性回归方程 $y=5.788x-16.043$ ($R^2=0.949$)、 $y=5.679x-16.837$ ($R^2=0.904$)、 $y=6.465x-19.573$ ($R^2=0.944$)。当接尘 30 年尘肺累计患病率 $\leq 1\%$ 时, 以安全系数为 1.2 计算, 三者呼尘接触浓度限值分别为 1.7、2.3、3.9 mg/m^3 。结论 不同煤种的尘肺病检出率、平均接尘工龄、呼尘接触浓度限值均不同, 在煤尘累计接尘量相似情况下, 煤的挥发分越低(含碳量越高), 累计患病率越高(无烟煤 > 烟煤 > 褐煤)。建议按照不同煤种分别制定国家职业卫生煤尘标准。

【关键词】 尘肺病; 煤炭; 剂量-反应关系

DOI: 10.3760/cma.j.cn112338-20190722-00537

Dose-response relationship between different respirable coal dust exposures and pneumoconiosis risk

Wang Xuetao, Zhang Ge

National Center for Occupational Safety and Health, National Health Commission of the People's Republic of China, Beijing 102308, China

Corresponding author: Wang Xuetao, Email: 13146686168@163.com

【Abstract】 Objective To investigate the dose-response relationship between the cumulative dust exposures to anthracite, bituminous coal, and lignite and the cumulative prevalence rates of pneumoconiosis due to the exposures, respectively and provide a basis for scientific development of occupational health standards. **Methods** Investigation on the exposure to coal dust and pneumoconiosis prevalence was conducted in 9 state-owned coal mines. The cumulative anthracite, bituminous coal, and lignite dust exposure specific cumulative prevalence rates of pneumoconiosis were calculated by life table method, respectively. The linear regression equations were used to control the unilateral interval to obtain the exposure concentration limits of the respirable coal dust, respectively. **Results** A total of 21 000 coal miners in the 9 coal mines were included in the study. The detection rates of pneumoconiosis in coal miners in anthracite, bituminous coal and lignite mines were 11.27%, 21.32%, and 6.00%. The average lengths of exposure to coal dust at pneumoconiosis onset were 20.12 years, 22.88 years, and 25.21 years, respectively and the dose-response relationships between the cumulative respirable coal dust exposure and the cumulative prevalence rates were all linear regression equations, which are $y=5.788x-16.043$ ($R^2=0.949$), $y=5.679x-16.837$ ($R^2=0.904$), and $y=6.465x-19.573$ ($R^2=0.944$), respectively. Supposing that the safety coefficient is 1.2, when the cumulative prevalence rate of pneumoconiosis after 30 years of exposure to dust is not higher than 1%, the exposure concentration limits of the three types of respirable coal dust are 1.7, 2.3, and 3.9 mg/m^3 , respectively. **Conclusions** The results of this study shows that the detection rate of pneumoconiosis, the average length of exposure to coal dust at pneumoconiosis onset, and the exposure concentration limits of the respirable coal dust varied with coal types. In the case of the same cumulative level of coal dust exposure, the lower the coal volatiles is (i.e. the higher the carbon content is), the higher the cumulative prevalence rate of pneumoconiosis is (anthracite > bituminous coal > lignite). It is suggested to develop national occupational health standards of coal dust exposure according to the grades of coal.

【Key words】 Pneumoconiosis; Coal; Dose-response relationship

DOI: 10.3760/cma.j.cn112338-20190722-00537

尘肺病是由于在职业活动中长期吸入生产性粉尘并在肺内滞留而引起的以肺组织弥漫性纤维化为主的全身性疾病^[1]。国内外流行病学调查结果表明,煤矿尘肺病患病率和工作场所煤尘浓度、劳动者接尘时间、煤尘中游离二氧化硅(SiO_2)含量、煤的挥发分等因素有关^[2-4]。我国根据煤的挥发分多少,将煤分为褐煤、烟煤和无烟煤3类。总体来说,煤尘浓度越高尘肺病发病率越高,煤尘中游离 SiO_2 含量越高尘肺病发病率越高,煤的挥发分越低(相当于含碳量越高)尘肺病发生率越高,但三者又相互制约,相互影响。我国煤尘职业接触限值的制定,是以劳动者接触煤尘30年,尘肺病患病率 $\leq 1\%$ 的情况下,按照煤尘中不同的游离 SiO_2 含量而规定不同的限值^[5-6],但这些标准中均未针对煤的挥发分不同而规定不同的限值。本研究以9处无烟煤、烟煤、褐煤煤矿采煤工人为研究对象,利用不同煤种累计接尘量与尘肺病累计患病率的剂量-反应关系,分析煤矿尘肺病发病的影响因素,推算出各煤种呼吸性粉尘浓度接触值,提出对不同煤种呼吸性粉尘制定不同职业接触限值的建议。

对象与方法

1. 研究对象:2013年选择河北、山西、山东、广西、内蒙古5个省(自治区)9处国有地方煤矿,这些煤矿煤尘中游离 SiO_2 含量均 $< 5\%$,并且包括无烟煤、烟煤和褐煤3个煤种;以9处煤矿采煤工作面的采煤工人为研究对象。排除职业史中曾从事掘进作业 > 2 年、或职业史不清楚、或在其他煤矿已接触煤尘、或缺乏系列X线胸片的采煤工人。

2. 研究方法:

(1)资料来源:现有资料主要包括各矿开始生产之日至2012年12月31日的采煤工人职业健康监护档案、煤矿职业病危害因素检测和评价报告,特别是采煤工人个人情况、煤尘接触史(重点是采煤工作起止年月)、X线胸片、尘肺病诊断结果、煤的品位情况、各采煤工作面依法依规定期检测的呼吸性粉尘浓度原始记录等情况。现场调查主要包括向接尘工龄较长的采煤工人了解往年接尘情况和煤矿职业健康管理情况,采用红外光谱法测量各矿采煤工作面煤尘样本的游离 SiO_2 含量。

(2)研究指标和变量定义:①采煤工人呼尘累计接尘量($\text{mg}\cdot\text{a}/\text{m}^3$),以下简称 $\text{mg}\cdot\text{a}$ 。数值上采用呼尘几何平均浓度(mg/m^3)乘以该工人接尘工龄(a)累计计算,计算公式为 $D = \sum(C_i T_i)$, T_i 为接尘工人在

i 岗位的工作时间, C_i 为在 i 岗位呼尘几何平均浓度,对于缺乏粉尘检测资料的年份,参考使用该矿有记录的相近年煤尘几何平均浓度。②每组别接尘人数。将呼尘累计接尘量(0~100)为第1组(简称为0~),以 $100\text{ mg}\cdot\text{a}$ 为组距,分别统计不同煤种各累计接尘量组别的接尘人数。③患尘肺病人数。考虑到我国尘肺病诊断标准多次修订,因此,依据GBZ 70—2015《职业性尘肺病的诊断》对所有接尘人员的X线胸片重新阅片,其医学意见结果仅用于本研究。④尘肺病患者患病工龄。从初次接触煤尘累计至确诊为尘肺病的接尘时间。⑤安全系数。根据美国职业接触限值(OEL)标准计算, $\text{OEL} = \text{无可见有害作用浓度或剂量}/\text{安全系数}$,一般粉尘安全系数范围为1~1.5,本研究中取煤尘安全系数为1.2^[7]。

(3)剂量-反应关系模型建立及统计控制方法:

①采用寿命表法计算3个煤种各累计接尘量组别的累计患病率。按照无烟煤、烟煤、褐煤3个煤种,根据统计所得每累计接尘量组别接尘人数、患尘肺病人数、未患病人数,逐步计算建立3个寿命表。②分别建立3个煤种累计接尘量与累计患病率的回归模型。将呼尘各累计接尘量组别的上限值转换成对数值 $x_n = \lg D_n$ (n 表示组别)作为自变量,各累计接尘量组别相应的累计患病率 P_n 换算成的 $y_n = \ln[P_n/(1-P_n)]$ 作为因变量,得到线性回归方程,检测其决定系数(R^2)。③利用回归方程进行统计控制,推算3个煤种采煤工作面呼尘的接触浓度值。首先,对于累计患病率为1%时的 y 值,利用线性回归方程计算累计接尘量对数值 x ,计算自变量为 x 时因变量 y 值的标准误 $\delta(x)$ 。其次,查 t 值表,用 y 值的单侧95%CI($\alpha=0.05$)上限计算(控制)相应 x 的上限。第三,计算20、25、30年接尘工龄对应的累计接尘量上限 D ,除以安全系数1.2,保留一位小数后得呼尘接触浓度值。

3. 统计学分析:数据录入Excel软件,建立原始数据库,梳理为3个寿命表后,以SPSS 15软件进行统计学分析。进行统计控制时,对自变量采用单侧95%CI($\alpha=0.05$)。

结 果

1. 不同煤种采煤工人尘肺病患病情况:9处煤矿中,无烟煤煤矿3处,烟煤煤矿2处,褐煤煤矿4处,这些煤矿煤尘中游离 SiO_2 含量波动范围为0.90%~4.90%。确定主要参加采煤作业、有系列X线胸片的共有21 000人,其中接触无烟煤、烟煤、褐煤的采煤工人尘肺病检出率分别为11.27%、21.32%、

6.00%，平均接尘工龄为 20.12、22.88、25.21 年；21 000 名采煤工人的尘肺病检出率为 15.35%，平均接尘工龄为 22.37 年。见表 1。

表 1 不同煤种尘肺病检出率及平均接尘工龄

煤种	煤矸数	游离 SiO ₂ 含量(%)	接尘人数	患尘肺病人数	检出率 (%)	平均接尘工龄(年)
无烟煤	3	1.48 ~ 2.19	6 923	780	11.27	20.12
烟煤	2	0.90 ~ 2.74	10 442	2 226	21.32	22.88
褐煤	4	2.01 ~ 4.90	3 635	218	6.00	25.21
合计	9	0.90 ~ 4.90	21 000	3 224	15.35	22.37

2. 3 种煤尘的呼尘累计接尘量及其累计患病率：无烟煤和褐煤累计接尘量最长达 700 ~ 800 mg·a，累计患病率分别高达 78.90%、23.47%；烟煤累计接尘量最长达 1 400 ~ 1 500 mg·a，累计患病率最高达 94.05%。见表 2 ~ 4。

3. 累计接尘量与患病关系的回归方程：根据表 2 ~ 4 中的呼尘累计接尘量和累计患病率，分别可得无烟煤、烟煤、褐煤的呼尘线性回归方程 $y = 5.788x - 16.043$ 、 $y = 5.679x - 16.837$ 、 $y = 6.465x - 19.573$ 。经检验，无烟煤、烟煤和褐煤决定系数分别为 0.949、0.904 和 0.944，因此，对于给定的累计患病率，可利用上述 3 个线性回归方程分别计算出相应的累计接尘量控制区间。

4. 累计接尘量上限的控制：当尘肺病累计患病率 $P = 1\%$ 时， $y = -4.595$ 。按无烟煤线性回归方程，计算可得 $x = 1.978$ ；而 $x = 1.978$ 时， y 的标准误差 $\delta(x) = 0.573$ ；查 t 值得 $t_{0.05}(6) = 1.943$ 。因此，当个体尘肺患病率 $P \leq 1\%$ ，即 y 单侧 95% 容许区间的上限 $y = -4.595 - t_{0.05}(6)\delta(x) = -4.595 - 1.943 \times 0.573 =$

表 2 无烟煤呼尘累计接尘量及其累计患病率

累计接尘量 $D_n(\text{mg}\cdot\text{a})$	观察人数 L_n	接尘人数 B_n	患病人数 A_n	未患病人数 W_n	校正人数 L'_n	患病率 $p_n(\%)$	未患病率 $q_n(\%)$	累计患病率 $P_n(\%)$
0 ~	6 923	2 618	103	2 515	5 665.5	1.82	98.18	1.82
100 ~	4 305	1 640	141	1 499	3 555.5	3.97	96.03	5.71
200 ~	2 665	912	154	758	2 286.0	6.74	93.26	10.44
300 ~	1 753	653	120	533	1 486.5	8.07	91.93	17.67
400 ~	1 100	702	157	545	827.5	18.97	81.03	33.29
500 ~	398	321	87	234	281.0	30.96	69.04	53.94
600 ~	77	57	13	44	55.0	23.64	76.36	64.83
700 ~ 800	20	20	5	15	12.5	40.00	60.00	78.90

注： B_n 、 A_n 由统计所得；观察人数 $L_{n+1} = L_n - B_n$ ， $L_1 = 6 923$ ；未患病人数 $W_n = B_n - A_n$ ；校正人数 $L'_n = L_n - W_n/2$ ；患病率 $p_n = A_n/L'_n$ ；未患病率 $q_n = 1 - p_n$ ；累计患病率 $P_n = 1 - q_1 q_2 \cdots q_n$

表 3 褐煤呼尘累计接尘量及其累计患病率

累计接尘量 $D_n(\text{mg}\cdot\text{a})$	观察人数 L_n	接尘人数 B_n	患病人数 A_n	未患病人数 W_n	校正人数 L'_n	患病率 $p_n(\%)$	未患病率 $q_n(\%)$	累计患病率 $P_n(\%)$
0 ~	3 635	540	7	533	3 368.5	0.21	99.79	0.21
100 ~	3 095	302	6	296	2 947.0	0.20	99.80	0.41
200 ~	2 793	502	37	465	2 560.5	1.45	98.55	1.85
300 ~	2 291	1 365	98	1 267	1 657.5	5.91	94.09	7.65
400 ~	926	708	62	646	603.0	10.28	89.72	17.15
500 ~	218	156	7	149	143.5	4.88	95.12	21.19
600 ~	62	56	1	55	34.5	2.90	97.10	23.47
700 ~ 800	6	6	0	6	3.0	0.00	100.00	23.47

注： B_n 、 A_n 由统计所得；观察人数 $L_{n+1} = L_n - B_n$ ， $L_1 = 3 635$ ；未患病人数 $W_n = B_n - A_n$ ；校正人数 $L'_n = L_n - W_n/2$ ；患病率 $p_n = A_n/L'_n$ ；未患病率 $q_n = 1 - p_n$ ；累计患病率 $P_n = 1 - q_1 q_2 \cdots q_n$

表 4 烟煤呼尘累计接尘量及其累计患病率

累计接尘量 $D_n(\text{mg}\cdot\text{a})$	观察人数 L_n	接尘人数 B_n	患病人数 A_n	未患病人数 W_n	校正人数 L'_n	患病率 $p_n(\%)$	未患病率 $q_n(\%)$	累计患病率 $P_n(\%)$
0 ~	10 442	1 474	106	1 368	9 758.0	1.09	98.91	1.09
100 ~	8 968	1 272	146	1 126	8 405.0	1.74	98.26	2.80
200 ~	7 696	1 281	172	1 109	7 141.5	2.41	97.59	5.15
300 ~	6 415	666	124	542	6 144.0	2.02	97.98	7.06
400 ~	5 749	1 086	212	874	5 312.0	3.99	96.01	10.77
500 ~	4 663	1 002	221	781	4 272.5	5.17	94.83	15.38
600 ~	3 661	954	250	704	3 309.0	7.56	92.44	21.78
700 ~	2 707	793	263	530	2 442.0	10.77	89.23	30.20
800 ~	1 914	943	295	648	1 590.0	18.55	81.45	43.15
900 ~	971	317	117	200	871.0	13.43	86.57	50.79
1 000 ~	654	183	94	89	609.5	15.42	84.58	58.38
1 100 ~	471	156	71	85	428.5	16.57	83.43	65.27
1 200 ~	315	136	65	71	279.5	23.26	76.74	73.35
1 300 ~	179	108	56	52	153.0	36.60	63.40	83.10
1 400 ~ 1 500	71	71	34	37	52.5	64.76	35.24	94.05

注： B_n 、 A_n 由统计所得；观察人数 $L_{n+1} = L_n - B_n$ ， $L_1 = 10 442$ ；未患病人数 $W_n = B_n - A_n$ ；校正人数 $L'_n = L_n - W_n/2$ ；患病率 $p_n = A_n/L'_n$ ；未患病率 $q_n = 1 - p_n$ ；累计患病率 $P_n = 1 - q_1 q_2 \cdots q_n$

-5.709。按呼尘线性回归方程计算 $x=1.786$ ，累计接尘量上限 $D=10^{1.786}=61.038 \text{ mg}\cdot\text{a}$ 。

同理,对于烟煤, $x=2.156, \delta(x)=0.751, t_{0.05}(13)=1.771$; 上限 $y=-4.595 - t_{0.05}(13) \delta(x)=-4.595 - 1.771 \times 0.751=-5.925$ 。 $x=1.922$, 累计接尘量上限 $D=83.479 \text{ mg}\cdot\text{a}$ 。

对于褐煤, $x=2.317, \delta(x)=0.576, t_{0.05}(6)=1.943$; 上限 $y=-4.595 - t_{0.05}(6) \delta(x)=-4.595 - 1.943 \times 0.579=-5.714$ 。 $x=2.144$, 累计接尘量上限 $D=139.266 \text{ mg}\cdot\text{a}$ 。

按采煤工人接尘20、25、30年计算,分别相除可得无烟煤、烟煤、褐煤的呼尘累计接尘量上限。采用安全系数法,对累计接尘量上限取1.2的安全系数,则无烟煤20、25、30年呼吸性粉尘接触浓度值分别为2.5、2.0、1.7 mg/m^3 ,烟煤的接触浓度值分别为3.5、2.8、2.3 mg/m^3 ,褐煤的接触浓度值分别为5.8、4.6、3.9 mg/m^3 。

讨 论

国外流行病学调查结果和实验研究表明,煤尘中游离 SiO_2 含量 $>5\%$ 时,煤工尘肺患病率显著增高,当游离 SiO_2 含量为 $1\% \sim 5\%$ 时,煤尘致巨噬细胞死亡率虽有上升趋势,但无显著性差异,其致肺纤维化作用也不甚显著,主要与煤尘接触量有关;游离 SiO_2 含量在 $5\% \sim 50\%$ 的粉尘毒性则呈现出随游离 SiO_2 含量上升而递增的趋势,表现出较强的致纤维化作用^[7]。我国的煤尘职业卫生标准中GBZ 2.1-2019是以游离 SiO_2 含量 $<10\%$ 为划分界限,AQ 4202中的煤尘是以游离 SiO_2 含量 $<5\%$ 作为划分界限,不同标准的划分界限不同,标准限值也不同,给企业粉尘治理和行政监管带来困惑。根据以往的研究^[8],我国90%的煤矿游离 SiO_2 含量都低于5%,含量较低,因此,游离 SiO_2 含量对煤矿采煤工人尘肺病的患病影响较小。

累计接尘量综合反映了工作场所粉尘浓度和劳动者接尘时间。当累计接尘量都为 $700 \sim 800 \text{ mg}\cdot\text{a}$ 时,无烟煤、烟煤、褐煤的累计患病率分别为78.90%、30.20%、23.47%,无烟煤 $>$ 烟煤 $>$ 褐煤。即煤尘含碳量越高,尘肺病累计患病率越高,提示在煤尘累计接尘量相似的情况下,煤尘含碳量对尘肺病的发病有重要影响。

本研究中,烟煤煤矿累计接尘量最大组别达 $1\ 400 \sim 1\ 500 \text{ mg}\cdot\text{a}$,无烟煤煤矿累计接尘量最大组别只有 $700 \sim 800 \text{ mg}\cdot\text{a}$,烟煤煤矿采煤工人尘肺病检出率(21.32%)高于无烟煤(11.27%),提示所研究煤矿采煤工人的煤尘累计接尘量对尘肺病的影响超

过了煤尘含碳量的影响,具体影响还有待于今后进一步研究。由此也可以说明煤尘的这些影响因素是相互制约的。

随着煤尘含碳量从无烟煤、烟煤到褐煤依次降低,其呼尘接触浓度限值依次升高,其中无烟煤和褐煤相差两倍多,有明显差异。

综上所述,对于煤矿采煤工人尘肺病,煤尘累计接尘量、煤尘含碳量(煤炭种类)都是影响因素,而游离 SiO_2 含量对煤矿尘肺病发病的影响较小。煤种不同,接触浓度限值相差很大。因此,建议在制定煤尘的国家职业卫生标准时,以游离 SiO_2 含量5%作为划分界限,按照不同煤种分别制定接触限值;同时,在执行现行国家职业卫生标准时,无论什么煤种,都要严格控制劳动者累计接尘量。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参 考 文 献

- [1] 王焕强,李涛.尘肺病的定义与历史[J].中国职业医学,2017,44(4):485-493. DOI:10.11763/j.issn.2095-2619.2017.04.019.
- [2] Wang HQ, Li T. Definition and history of pneumoconiosis [J]. Chin Occup Med, 2017, 44 (4) : 485-493. DOI: 10.11763/j.issn.2095-2619.2017.04.019.
- [3] 范雪云,高济万,李庆友,等.不同变质期煤尘致纤维化作用的实验研究[J].中华预防医学杂志,1991,25(3):139-142.
- [4] Fan XY, Gao JW, Li QY, et al. An experimental study of the fibrogenic effect of different metamorphic coal dusts [J]. Chin J Prev Med, 1991, 25(3):139-142.
- [5] 黄昭维,金焱.煤工尘肺防治的研究进展[J].职业卫生与病伤,2005,20(2):110-112. DOI:10.3969/j.issn.1006-172X.2005.02.010.
- [6] Huang ZW, Jin Y. Progression on the prevention of coal workers' pneumoconiosis [J]. J Occupat Health Damage, 2005, 20 (2) : 110-112. DOI: 10.3969/j.issn.1006-172X.2005.02.010.
- [7] Attfield MD, Seixas NS. Prevalence of pneumoconiosis and its relationship to dust exposure in a cohort of U.S. bituminous coal miners and ex-miners [J]. Am Jind Med, 1995, 27(1):137-151. DOI:10.1002/ajim.4700270113.
- [8] 国家卫生健康委员会. GBZ2.1-2019 工作场所有害因素职业接触限值 第1部分:化学有害因素[S].北京:中国标准出版社,2019.
- [9] National Health Commission. GBZ 2.1-2019 Occupational exposure limits for hazardous agents in the workplace—Part 1: Chemical hazardous agents [S]. Beijing: China Standards Press, 2019.
- [10] 国家安全生产监督管理总局. AQ 4202—2008 作业场所空气中呼吸性煤尘接触浓度管理标准[S].北京:煤炭工业出版社,2009.
- [11] State Administration of Work Safety. AQ 4202—2008 Administrative standard for personal exposure concentration of respirable coal dust in the air of workplace [S]. Beijing: Coal Industry Press, 2009.
- [12] 王欣平,刘铁民.呼吸性煤尘与尘肺的剂量-反应关系分析[J].中国安全生产科学技术,2007,3(2):70-73. DOI:10.3969/j.issn.1673-193X.2007.02.016.
- [13] Wang XP, Liu TM. Study on the dose-response relationship between respirable coal dust and pneumoconiosis [J]. J Saf Sci Technol, 2007, 3 (2) : 70-73. DOI: 10.3969/j.issn.1673-193X.2007.02.016.
- [14] 冯志斌,杨勇.《作业场所空气呼吸性煤尘接触浓度管理标准》解读[J].劳动保护,2010(6):56-57.
- [15] Feng ZB, Yang Y. Interpretation of Administrative standard for personal exposure concentration of respirable coal dust in the air of workplace [J]. Labour Prot, 2010(6):56-57.

(收稿日期:2019-07-22)

(本文编辑:万玉立)